

**ZERSTÖRUNGSFREIE-, MECHANISCH-
TECHNOLOGISCHE-, METALLOGRAPHISCHE-
UND ELEKTROCHEMISCHE UNTERSUCHUNGEN
AN IM ZAHNTECHNISCHEN LABORATORIUM
HERGESTELLTEN LÖTUNGEN VON
DENTALLEGIERUNGEN**

Eckhard Diekert

1978



Digitized by the Internet Archive
in 2026

AUS DER POLIKLINIK FÜR ZAHNÄRZTLICHE PROTHETIK
DER UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Direktor: Professor Dr. E. Kraft

ZERSTÖRUNGSFREIE-, MECHANISCH- TECHNOLOGISCHE-,
METALLOGRAPHISCHE- UND ELEKTROCHEMISCHE UNTER-
SUCHUNGEN AN IM ZAHNTECHNISCHEN LABORATORIUM
HERGESTELLTEN LÖTUNGEN VON DENTALLEGIERUNGEN



Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde in der Zahnheilkunde
der Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von
Dr. med. Eckhard Dielert
aus Berlin

München 1977



Mit Genehmigung des Fachbereichs Medizin der Universität München

Berichterstatter: Prof. Dr. E. Kraft

Dekan: Prof. Dr. W. Spann

Tag der mündlichen Prüfung: 11.7.1978

INHALTSÜBERSICHT

	Seite
1. AUFGABENSTELLUNG	1
2. VORBEREITUNGEN ZU EIGENEN UNTERSUCHUNGEN	4
2.1 Verwendete Dentallegierungen	4
2.1.1 Edelmetalllegierungen	4
2.1.2 Kobalt-Chrom-Molybdän-Legierungen	6
2.1.3 Kobalt-Chrom-Nickel-Drahtmaterial	7
2.1.4 Dentallote	8
2.2 Herstellung der Gußproben	10
2.2.1 Allgemeines	10
2.2.2 Gußprobenherstellung der Dentalgoldlegierungen	13
2.2.3 Gußprobenherstellung der Kobalt-Chrom-Molybdän-Legierung	16
2.3 Verbindearbeiten (Löten)	18
2.3.1 Allgemeines	18
2.3.2 Lötung der Dentalgoldlegierungen	19
2.3.3 Lötung der Kobalt-Chrom-Molybdän-Legierung und des Kobalt-Chrom-Nickel-Drahtmaterials	21
2.4 Beschreibung der Prüfkörper	23
3. DURCHFÜHRUNG UND ERGEBNISSE DER VERSUCHE	25
3.1 Röntgengrobstrukturuntersuchung	25
3.1.1 Allgemeines	25
3.1.2 Beschreibung des Röntengerätes	27
3.1.3 Ergebnisse	29

	Seite
3.2 Zugversuche	30
3.2.1 Allgemeines	30
3.2.2 Versuchsdurchführung	32
3.2.3 Ergebnisse	32
3.3 Härtemessungen	35
3.3.1 Allgemeines	35
3.3.2 Versuchsdurchführung	36
3.3.3 Ergebnisse	38
3.4 Metallographische Untersuchungen	39
3.4.1 Allgemeines	39
3.4.2 Schliffherstellung	40
3.4.3 Deutung der Gefügeerscheinungen bei der Kobalt-Chrom-Molybdän-Legierung	41
3.4.4 Deutung der Gefügeerscheinungen bei den Dentalgoldlegierungen	45
3.5 Rasterelektronenmikroskopische (REM) Unter- suchungen	48
3.6 Korrosionsversuche	49
3.6.1 Allgemeines	49
3.6.2 Korrosion an der Kobalt-Chrom- Molybdän-Legierung	53
3.6.3 Korrosion an den Goldlegierungen	53
3.6.4 Methoden zur Bestimmung des Korrosions- angriffes	55
3.6.5 Versuchsaufbau und Versuchsablauf	57
3.6.6 Korrosionserscheinungen an den Kobalt- Chrom-Molybdän-Proben	59
3.6.7 Korrosionserscheinungen an den Gold- proben	59

	Seite
3.7 Bildanhang	63
4. DISKUSSION	76
5. ZUSAMMENFASSUNG	80
6. LITERATURÜBERSICHT	85

1. AUFGABENSTELLUNG

Das Löten gehört auch heute zu den häufigen Arbeitsgängen des zahntechnischen Laboratoriums, wenngleich beim Verfahren des Angießens und auf dem Gebiet des Modellgusses in den letzten Jahren Fortschritte zu verzeichnen waren. Von den zahlreichen bekannten Schweißverfahren dagegen wird das Verbindungsschweißen nur in Form des elektrischen Punktschweißens, wodurch lediglich kleine Flächen thermisch miteinander verbunden werden können, angewandt. Dies, obwohl bekannt ist, daß das Schmelzschweißen die sicherste Methode ist, zwei Werkstücke zu vereinigen.

Der Grund hierfür ist darin zu sehen, daß die in der Zahnärztlichen Prothetik üblichen kleindimensionierten Arbeiten bisher große Probleme an die genannte Verbindungstechnik stellen. Das Elektronenstrahlschweißen ist ein zu aufwendiges und teures Verfahren, während das Wolframinertgas-schweißen (WIG) am instabilen Lichtbogen bei den erforderlichen niedrigen Schweißströmen scheitert. Das neu entwickelte Laserstrahlschweißen ist ebenfalls ein sehr teures Verfahren. Seine weitere Entwicklung bleibt abzuwarten, obwohl erfolgsversprechende Ergebnisse gemeldet werden (GAGLIANO (18), GORDON (19), KERR (32), LUMEBEY (39), NATH (43, 44), SMITH (52), WATHKINS (61)).

Da die Ansprüche an die Leistungsfähigkeit metallischer Werkstoffe und die Belastbarkeit der Verbindung dauernd höher werden, sind in den letzten Jahren auch bei der Weiterentwicklung der Lötverfahren erhebliche Fortschritte gemacht worden. So konnten durch Induktionslötung und durch das Löten im Vakuum oder in reduzierender Schutzgasatmosphäre auch bei konventionellen metallischen Werkstoffen erhebliche Verbesserungen der mechanischen und technologischen Eigenschaften erzielt werden.

Wenn im Zahntechnischen Laboratorium noch nach dem alten Verfahren mit Leuchtgas-Preßluft-Lötpistole und Flußmittel

gearbeitet wird, so mag das zum Teil daran liegen, daß die heute in der Zahnheilkunde verwendeten Goldmetalllegierungen und Edelmehle bei sachgemäßer Verarbeitung ihre guten Eigenschaften beibehalten. Nun können aber trotz richtiger Auswahl der Materialien durch technische Fehler, die sich von der Gußverformung bis zur thermischen Behandlung beim Lötén in den Arbeitsgang einschleichen, erhebliche Qualitätseinbußen auftreten.

Dem Kliniker sind solche Erscheinungen in Form von gelegentlichen Verfärbungen am Zahnersatz, die das Anfangsstadium einer später erfolgenden Korrosion anzeigen, in Form von "Lochfraß", metallischem Geschmack im Munde des Patienten, Entzündungen der Mundschleimhaut bis zu Magen- und Darmschleimhautentzündungen u.a.m. hinreichend bekannt.

Wenn die in der Zahnärztlichen Prothetik heute verwendeten Legierungen bezogen auf die im Munde herrschenden Verhältnisse korrosionsbeständig sind, so kann es doch nach der Lötung zur Korrosion kommen. Wegen der geringen Ausdehnung spricht man von "Lokalelementen". Hierbei bilden die Löt-nähte fast immer die anodischen, in Lösung gehenden, blank bleibenden Bezirke, während sich die danebenliegenden Metallteile verfärben (ECKMANN (14), HEER (23), HEROLD (27), LOEBICH (38), (STEGEMANN (53, 55, 56, 58), WEIKART (63)).

Ein weiteres Problem stellt sich dem Zahntechniker in der Gestaltung der Oberfläche und der Abmessung des Lötspaltes. Während hier ein "lötgerechtes Konstruieren" kaum möglich ist, da jede Arbeit ein individuelles Formstück darstellt, beginnt in der Industrie "das richtige Lötén bereits am Reißbrett" (DEGUSSA (9)). Auch sind bei der genannten Methode das Erreichen und Einhalten der Arbeitstemperatur des Lotes sowie der Bereich "minimale-maximale Lötzeit" weitgehend subjektiven Einflüssen unterworfen.

Sinn und Aufgabe dieser Arbeit konnte es nicht sein, die Lötbarkeit und Lötéignung der heute gebräuchlichen Dentallegierungen zu untersuchen, da hierüber keine Zweifel mehr

bestehen. Es galt vielmehr die Löttsicherheit, d.h. deren Bewährung im Labor festzustellen. So sollte überprüft werden, ob die von den Herstellern der Dentallegierungen gemachten Angaben über Festigkeit der Lötverbindungen, Lotgefüge, Füllungsgrad des Lotspaltes und sein Korrosionsverhalten mit den routinemäßig im Zahntechnischen Laboratorium ausgeführten Verbindungsarbeiten übereinstimmen. Außerdem sollte eine Aussage darüber gemacht werden, ob das angewandte Lötverfahren den Ansprüchen, die heute an die Verbindungstechniken gestellt werden können und in der Zahnmedizin gestellt werden müssen, noch gerecht wird.

2. VORBEREITUNG ZU EIGENEN UNTERSUCHUNGEN

2.1 Verwendete Dentallegierungen

2.1.1 Edelmetalllegierungen

Die für zahnärztliche Arbeiten verwendeten Edelmetalle zeichnen sich insbesondere dadurch aus, daß sie gegen korrosive Angriffe widerstandsfähig sind. Diese Eigenschaft ist unter anderem durch die Lage des Goldes in der Spannungsreihe der Elemente bedingt. Sie kommen jedoch nicht in reiner Form, sondern vor allem als Legierungen, auch mit Zusätzen von Unedelmetallen, zur Anwendung. So konnten die Gußlegierungen durch Zufügen geeigneter Metalle zur Kornfeinung, insbesondere Platin, in ihren technologischen und chemischen Eigenschaften wesentlich verbessert werden. Die in dieser Arbeit verwendeten Edelmetallwerkstoffe Degulor B und Degulor MO (Degussa) haben die in Tabelle 1 angegebene chemische Zusammensetzung und die in Tabelle 2 aufgeführten mechanischen und physikalischen Eigenschaften.

	Au	Ag	Cu	Pt	Pa	Zn	(Gew. %)
Degulor B	75	20	4	Rest	-	-	(etwa gleiche Größenordnung)
Degulor MO	70	15	10	Rest	-	-	(mehr als in Degulor B)

Tab. 1: Chemische Zusammensetzung der Degulor-Legierungen in Gew.-% (KNOSP (33))

	Schmelz- intervall	Brinell- Härte	Zugfestig- keit	Fließ- grenze	Deh- nung	Spez. Gew.	Aushärtbar d. langsam.Abkühlen nach dem Gießen	Maxim. Aushärtung durch Wärmebehandl.
°C	HB 10/2,5	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%	g/cm ³		°C
		w	a	w	a	w	a	
Degulor B	1040-960	82	-	400	-	21	-	35
								16,1
							nein	-
Degulor MO	990-900	175	260	660	950	48	87	34
								10
							ja	400
								15

w = weich a = ausgehärtet

Tab. 2: Mechanische und physikalische Eigenschaften der Degulor-Legierungen (Degussa, Werksangabe)

2.1.2 Kobalt-Chrom-Molybdän Legierungen

Die in der Zahnmedizin vor allem für Prothesengerüste und Implantate verwendeten Kobalt-Chrom-Molybdän Gußlegierungen besitzen eine gute Beständigkeit gegen chemische und elektrochemische Einflüsse. Diese Beständigkeit wird durch eine Deckschicht erreicht, die selbst von den aggressiven Chloridionen nur bedingt angegriffen wird (CRESS (6)). Entscheidend hierfür ist der prozentual hohe Chromgehalt. Sie haben aber gegenüber den Goldlegierungen eine höhere Gußkontraktion (Gold 1,35 - 1,50 %; Co-Cr-Legierung 2,4 %). Die Festigkeit ist durch das hexagonale Gitter des Kobalts bedingt. Chrom als Legierungsbestand erhöht die Zugfestigkeit um ca. 10 N/mm² je 1 % Cr; dabei sinkt die Bruchdehnung nur um 1,5 % (DOMKE (13)). Die in dieser Arbeit verwendete Kobalt-Chrom-Molybdän Gußlegierung (Cowadental) hat die in Tabelle 3 angegebene chemische Zusammensetzung und die in Tabelle 4 aufgeführten mechanischen und physikalischen Eigenschaften.

	C	Si	Mn	Cr	W	Mo	Fe	Co (Gew. %)
Co-Cr-Mo (Cowadental)	0,54	0,70	0,46	29,30	1,04	5,46	0,10	Rest ca. 65

Tab. 3: Chemische Zusammensetzung der Co-Cr-Mo-Gußlegierung in Gew.-% (Cowadental Werksangabe (5))

	Biegefe- stigkeit N/mm ²	Zugfe- stigkeit N/mm ²	Deh- nung %	Ausschmel- zung %	Brinell- Härte HB 10/2,5	Schmelz- punkt C°
Co-Cr-Mo (Cowadental)	810	850	4	4	365	1.350

Tab. 4: Mechanische und physikalische Eigenschaften der Co-Cr-Mo-Guße-
gierung (Cowadental Werksangabe (5))

2.1.3 Kobalt-Chrom-Nickel Drahtmaterial

Die Befestigung abnehmbaren Zahnersatzes bei noch vorhandenen eigenen Zähnen erfolgte vor Einführung des nichtrostenden Stahles entweder durch Klammern aus Gold oder aus unedlen, dem Messing ähnlichen gesundheitsschädlichen Legierungen. Da Klammern im Munde beim Kauen einer Dauerbiege-Wechselbeanspruchung unterliegen und diese Kräfte den Werkstoff nicht verformen dürfen, muß ein Material von hoher Dauerbiegewechselfestigkeit verwendet werden. Bei den Kobalt-Chrom-Legierungen bleibt nun infolge Reduzierung des Kobalt Anteiles zugunsten von Nickel die spontane Härtung durch die Kobalt Umwandlung aus und kann später durch Bearbeitung gerichtet durchgeführt werden (HALBACH (20, 21), HENKEL (24), KRUPP (35)). Lösungsgeglüht hat das in dieser Arbeit verwendete Drahtmaterial "Redur" (Deutsche Edelstahlwerke) die niedrigste Härte und das höchste Dehnungsvermögen (880 N/mm² Zugfestigkeit, 55 % Dehnung). Im Handel wird "Redur" jedoch nur halbhart, also nach geringer Verfestigung angeboten, um zu gewährleisten, daß schon durch leichte Zangenbearbeitung des Werkstoffes eine merkliche Aushärtung und hohe Federkraft erreicht werden (DEW (10)). Die Tabelle 5 gibt die chemische Zusammensetzung und die Tabelle 6 die mechanischen und physikalischen Eigenschaften des Co-Cr-Ni-Drahtmaterials "Redur" an.

	C	Fe	Ni	Cr	Co	Si	Mn (Gew. %)
"Redur"	0,12	1,9	24,0	27,0	46,0	0,4	0,5

Tab. 5: Chemische Zusammensetzung des Co-Cr-Ni-Drahtmaterials
"Redur" in Gew.-%

	Streck- grenze	Zugfestig- keit	Brinell- Härte	Dehnung	Spezifisches Gewicht
	N/mm ²	N/mm ²	HB 10/2,5	%	
"Redur"	900	1300	320	40	8,0 - 8,4

Tab. 6: Mechanische und physikalische Eigenschaften des Co-Cr-Ni-Drahtmaterials "Redur" (halbhart)

2.1.4 Dentallote

Bei den in der Zahnmedizin verwendeten Loten handelt es sich fast ausschließlich um zusammengesetzte Hartlote (LOEBICH (37)). Bei den Hart- oder Schlagloten liegt der Schmelzpunkt nicht unter 500°C. Der Liquiduspunkt eines Lotes soll wenigstens 50°C tiefer als der Soliduspunkt der zu lötenden Legierung liegen. Brauchbar sind nur solche Lote, bei denen mit dem zu lötenden Werkstoff auch im festen Zustand Löslichkeit besteht (COLBUS (4), SCHATZ (47)). Zweckmäßigerweise verwendet man das von der Herstellerfirma für die betreffende Legierung empfohlene Lot. So ist das Degulor-Lot 1 (Degussa) ein Hauptlot mit einer Arbeitstemperatur von 800°C für die Legierungen Degulor B und Degulor MO. Die Tabelle 7 gibt die chemische Zusammensetzung und die Tabelle 8 die Festigkeit der Lötverbindung bei Degulor B und dem aushärtbaren Degulor MO an.

	Au	Ag	Cu	Cd	Pt	Zn	Pa (Gew. %)
Degulor Lot 1	70	9	9	9	Rest	-	-

Tab. 7: Chemische Zusammensetzung des Degulor-Lot 1 in Gew.-% (KNOSP (33))

Behandlung der Probe nach dem Löten		Zugfestigkeit der Lötver- bindung in N/mm ² Mittelwert ± mittlerer Fehler
Degulor B	an Luft abgekühlt	390 ± 20
Degulor MO	an Luft abgekühlt	420 ± 60
Degulor MO	an Luft abgekühlt und anschließend 15 Min. bei 400°C ausgehärtet	550 ± 50
Degulor B	Löten nach Einbetten	390 ± 20
Degulor MO	in Lötsand; mit Asbestwatte abgedeckt und langsam abgekühlt	580 ± 80

Tab. 8: Mechanische Festigkeit der Lötverbindung mit Degulor-Lot 1
bei Degulor B und dem aushärtbarem Degulor MO (Degussa
Werksangabe (8))

Speziell für korrosionsbeständige Lötungen an Edelstahl- und Kobalt-Chrom-Molybdän-Legierungen wurde das hochkarätige Stahl-Goldlot DWL 801 (Degussa) entwickelt. Seine Farbe kommt den genannten Legierungen nahe und die Arbeitstemperatur liegt bei 930°C. Die Tabelle 9 gibt die chemische Zusammensetzung des Lotes DWL 801 an.

	Au	Ni	Zn (Gew.-%)
DWL 801	85	10-20	5-10

Tab. 9: Chemische Zusammensetzung des Stahl-Goldlotes DWL 801 in
Gew.-% (KNOSP (33))

2.2 Herstellung der Gußproben

2.2.1 Allgemeines

Um in dieser Arbeit durch die zerstörungsfreien-, mechanisch-technologischen-, metallographischen- und chemischen Prüfverfahren zu Gütewerten für die Lötungen zu kommen, ist es abgesehen von der vorschriftsmäßig und exakt durchzuführenden Lötung erforderlich, gleiche und gleichwertige Gußproben herzustellen. Es hat sich als vorteilhaft erwiesen, folgende Arbeitsmethode streng einzuhalten (WEIKART (62)):

1. Stets das gleiche Wachs verwenden
2. Stets dieses Wachs in der gleichen Weise verarbeiten
3. Stets die gleiche Einbettmasse benutzen
4. Stets dasselbe Mischungsverhältnis einhalten
5. Stets nach gleicher Zeit einbetten
6. Stets dieselbe Einbettmethode anwenden
7. Stets nach gleicher Zeit mit dem Vorwärmen beginnen
8. Stets dieselbe Vorwärmtemperatur einhalten
9. Stets dieselbe Vorwärmzeit einhalten
10. Stets die gleiche Gußlegierung verwenden
11. Stets dieselbe Gußapparatur verwenden
12. Stets gleichmäßig abkühlen lassen

Durch richtig angewandte Gußtechnik sollen sich insbesondere Seigerungen, Gasblasen, Lunker und Einschlüsse weitgehend vermeiden lassen. Alle Formen der Seigerung begünstigen die Bildung von Lokalelementen. Durch die dadurch hervorgerufene Korrosion sind sowohl der Guß als auch die Lotnaht gefährdet.

Alle Folgen der Gasblasenbildung sind hinreichend bekannt. Besondere Bedeutung erlangen diese dadurch, daß ihre Wände mit Verunreinigungen wie Oxyden und Desoxydationsprodukten angereichert sind. Eine in diesen Bereich gelegte Lotnaht muß erhebliche Qualitätseinbußen hinnehmen.

Lunker dagegen enthalten im allgemeinen kein oxydierendes Gas, können jedoch dadurch, daß sie an die Oberfläche zu liegen kommen, bei der Lötung durch Veränderung der Löt-

spaltbreite einen gestörten kapillaren Fülldruck bedingen.

Bei den Einschlüssen sind exogene und endogene zu unterscheiden. Feine, gleichmäßig verteilte Einschlüsse schaden weniger als grobe und örtliche Ansammlungen. Letztere können auf den Korngrenzen zum Primärkorngrenzenbruch führen. Durch verschiedenste Mechanismen ist auch hierdurch eine Qualitätsminderung der Lotnaht bedingt. Aus den dargelegten Gründen wurde der Herstellung der Gußproben besondere Bedeutung beigemessen. Die Empfehlungen der Herstellerfirmen wurden genau eingehalten. Wenn es sich hier auch um äußerst einfach konstruierte Prüfkörper handelt, die mit den oft recht komplizierten Arbeiten eines Dentallabors nicht vergleichbar erscheinen, so sollen doch jeder Arbeitsgang, alle verwandten Materialien und Laborgeräte Erwähnung finden.

Außerdem ist zu bedenken, daß bei Werkstoffprüfungen viele Eigenschaften von der Gestalt und Größe des Prüfkörpers abhängig sind. Fast alle Eigenschaften, die in Normblättern, Typisierung usw. aufgeführt werden, wurden an sogenannten "Normal"-Prüfkörpern ermittelt, so daß die erhaltenen Werte u.a. gestaltsabhängig sind und nicht bedenkenlos auf beliebig geformte Erzeugnisse übertragen werden können (NITZSCHE (45)). Das DIN-Taschenbuch 19 stellt eine Zusammenfassung der Materialprüfungsnormen für metallische Werkstoffe dar. Nur so sind die Ergebnisse verschiedener Prüfer miteinander vergleichbar. Kennzeichnend für den Zweig der Zahntechnik ist nun, daß die Herstellung von Zahnersatz oder Zahnfüllungen in ihren wesentlichen Arbeitsphasen eine handwerkliche Tätigkeit ist, und dies auch bleiben wird. Jede Zahnprothese, -krone oder -füllung stellt somit ein individuelles Formstück dar. DIN-Normen sind hier nicht üblich, da einer Typisierung oder Standardisierung des zahntechnischen Formstückes die Tatsache entgegensteht, daß jedes Gebiß ein Individualfall ist, in das ein standardisiertes Formstück sich kaum eingliedern läßt. Was Anzahl, zweckmäßigste Formgebung sowie Bemessung der Prüfkörper betrifft, so waren in der vorliegenden Arbeit

insbesondere wegen des hohen Preises der Edelmetalllegierungen aus Materialersparnisgründen Grenzen gesetzt. Da nach HENKEL (25) für statistische Untersuchungen wenigstens 35 Einzeluntersuchungen notwendig sind, mußte auf die Errechnung einer statistischen Signifikanz verzichtet werden. Die benötigten Prüfkörper wurden in geeigneter Form als Platinen und Rundstäbe gegossen. Legierung, Abmessungen und Anzahl der Gußproben siehe Tabelle 10 und Bild 1.

Dentallegierung	Art der Probe	Abmessung in mm	Anzahl
Degulor B	Platine	10 x 10 x 1	8
	Rundstab	Länge: 25; $\emptyset$ 1,5	8
Degulor MO	Platine	10 x 10 x 1	8
	Rundstab	Länge: 25; $\emptyset$ 1,5	8
Kobalt-Chrom-Molybdän	Platine	20 x 10 x 1	8
	Rundstab	Länge: 25; $\emptyset$ 1,5	12

Tab. 10: Legierung, Abmessungen und Anzahl der Gußproben

Da trotz richtiger Auswahl der Materialien durch technische Fehler, die sich vom Beginn bis zur Fertigstellung in den Arbeitsgang einschleichen können, eine Qualitätsmin- derung des Gußobjektes bedingt ist, wurde ein Arbeitsver- fahren angewandt, das für die ausgesuchten aufeinander ab- gestimmten Werkstoffe und Geräte entwickelt wurde (Degussa Briefe (9), EICHNER (15), HERING (26), JUNG (30), PATTERSON (46), SCHWINDLING (49), WAGNER (60)).

2.2.2 Gußprobenherstellung der Dentalgoldlegierungen

Bei der Herstellung der Proben aus den beiden Edelmetallegerierungen Degulor B und Degulor MO wurde nach der gleichen Methode gearbeitet. Deshalb sollen die Arbeitsgänge hier auch gemeinsam abgehandelt werden.

Die Wachsmodelle für die Platinen wurden in der Größe 10 mm x 10 mm aus 1 mm dickem farblosen Platten-Gußwachs herausgestanzt.

Dieses ist ein Gemisch von Wachsen verschiedener Art mit Zusätzen von Stearin, Harzen sowie anorganischen und organischen Stoffen, das rückstandslos verbrennt. Als Modell für die Rundstäbe dienten die von der Firma Degussa gelieferten Messing-Gußstiftröhrchen mit der Länge von 35 mm und einem Durchmesser von 1,5 mm.

Um Poren- und Lunkerbildung beim Guß im Prüfkörper zu vermeiden, wurde der Gußkanal so dick gewählt, daß eine Nachspeisung mit noch flüssiger Schmelze zum Ausgleich der Erstarrungskontraktion gewährleistet war. Um zu erreichen, daß die Schmelze ohne schroffe Änderung der Strömungsrichtung in die Hohlform gelangt, wurde der zylindrische Wachsdraht mit einem Durchmesser von 3 mm so an einer Ecke des Wachsmodellens angebracht, daß dessen Diagonale die Verlängerung des Gußkanales darstellt.

Die Gußstiftröhrchen wurden auf eine Länge von 10 mm in den ebenfalls 3 mm starken Gußkanal zentral eingelassen, um sie nach dem Auswachsen besser entfernen zu können. Anschließend wurde ihre verbleibende obere Öffnung ohne Überschuß mit Gußwachs verschlossen. Da hier auf eine thermische Wachsentspannung verzichtet werden konnte, wurden die Modelle zum Erreichen einer glatten Gußoberfläche ohne Gußperlen und Rauigkeiten lediglich in die Lösung des Netzmittelpräparates Waxit getaucht und anschließend durch Abblasen getrocknet. Waxit besteht aus Zellulose, Äthylalkohol sowie Glycerin.

Sofort daran anschließend wurde mit den vorbereitenden Maßnahmen zum Einbetten begonnen. Hierzu wurden jeweils 4 gleiche Modelle mit ihren Gußkanälen symmetrisch auf dem

Kegel eines an seiner Basis mit einer Metallplatte verstärkten Gußtrichterformers mit Wachs fixiert. Dies geschah in der Weise, daß der Abstand ihres obersten Punktes vom oberen Küvettenrand jeweils nur ca. 4 mm betrug, um so sicherzustellen, daß die Erstarrung der flüssigen Legierung nach dem Guß vom äußersten Ende des Gußobjektes in Richtung des Gußkanalansatzes verlief. Weiterhin wurde darauf geachtet, daß sich die Modelle im Zentrum der Küvette mit jeweils gleichem Abstand zum seitlichen Küvettenrand befanden, um so gleiche Abkühlungsbedingungen zu erreichen. Um somit homogene Gußproben zu erhalten, wurden die Wachsmodeillplättchen auch mit ihrer Fläche der Küvettenwand zugeordnet. Dadurch, daß alle Gußobjekte außerhalb des Wärmezentrums der Küvette lagen, war eine Schmelzreserve für das früher erstarrende Objekt gesichert.

Damit nun die Einbettmasse während des Abbindens und Vorwärmens ungehindert expandieren konnte, wurde die zunderfeste Gußküvette der Größe 3 x mit einer Schicht Asbestpappe von 0,7 mm Dicke ausgekleidet und anschließend auf den zugehörigen Gußtrichterformer V 1 x / 3 x gesetzt. Vor dem Einfüllen der Einbettmasse nach der Vakuum-Technik wurde die Asbestpappe mit einigen Tropfen Wachs an der Küvette fixiert und mäßig angefeuchtet.

Zum Einbetten wurde die gipsfreie auf Phosphatbasis aufgebaute Einbettmasse Deguvest HFG verwandt, bei der die Schrumpfung der Legierung durch Abbinde- und thermische Expansion kompensiert wird. Diese wird mit einer Spezialflüssigkeit angerührt, die im Anlieferungszustand als Konzentrat vorliegt und mit destilliertem Wasser verdünnt wird. Im vorliegenden Fall wurden 25,5 ml einer 60 %igen Anmischflüssigkeit mit 180 g Pulver im Vacu-Einfüllbecher 30 Sekunden lang bei 360 U/min des Rührwerkes mit dem Multivac 2 angemischt und anschließend in die Küvette eingerüttelt. Das genannte Anrühr- und Evakuiergerät, dessen Pumpe ein Vakuum von ca. 8 Torr erreicht, ermöglicht das Anmischen und Einbetten unter Vakuum, wodurch störende Lufteinschlüsse weitgehend vermieden werden, die zu Rauigkeiten und Gußperlen an der Werkstückoberfläche führen können.

Hiernach blieben die Küvetten zum vollständigen Abbinden und Vortrocknen der Einbettmasse 40 Minuten an Luft stehen. Das Auswachsen erfolgte in einem auf 200°C vorgeheizten Elektro-Trockenschrank, in dem die Gußform senkrecht mit dem Gußtrichter nach unten aufgestellt wurde. Nach 40 Minuten wurden die Küvetten rasch mit der Muffelzange in einen auf ebenfalls 200°C vorgewärmten Elektroofen mit Dentaregler umgesetzt, um einen Temperaturschock zu vermeiden und darin zentral gelagert, nachdem die Gußstift-röhrchen mit einer spitzen Zange vorsichtig entfernt worden waren. Dann wurde sein Temperaturregler auf die erforderliche Vorwärmtemperatur - beim Degulor MO 700°C und beim Degulor B 750°C - eingestellt. Nach Erreichen der gewünschten Temperatur verblieben die Küvetten noch 30 Minuten im Ofen. Diese Zeiten und Temperaturen wurden genau eingehalten, um der Gefahr der Sauglunkerbildung bei zu niedriger Vorwärmtemperatur und der Porenbildung an der Oberfläche des Objektes bei zu hoher Vorwärmtemperatur vorzubeugen.

Inzwischen war der elektrische Schmelzofen der Degussa Tie-gelschleuder-T₃, einer aufziehbaren Horizontal-Gußschleuder mit Katapulteinrichtung 30 Minuten lang vorgeheizt. Durch Erhöhung der Spannung wurde die für den Schmelzvorgang erforderliche höhere Temperatur erreicht und der Degussa Kohletiegel "SV" eingeschoben. Erst als der Kohletiegel helle Rotglut erreicht hatte, wurden die Gußplättchen eingefüllt. Nach Beendigung des Aufschmelzens der Edelmetall-legierungen wurde die Schmelze zum Erreichen der richtigen Gießtemperatur, die etwa 50°C über ihrer Liquidustemperatur liegt, noch etwa 30 Sekunden weiter erhitzt.

Nun wurde die Küvette mit der Muffelzange aus dem Vorwärm-ofen geholt, schnell in die Schleuder eingebracht (Gußver-zugszeit nach Uhlig), der elektrische Kontaktarm gelöst und die Schleuder ausgelöst. Der freie Auslauf wurde abgewar-tet, um auf den Erstarrungsablauf keinen negativen Einfluß auszuüben.

Die für Dentallegierungen günstigste Erstarrungsform ist die endogen schalenbildende, wobei die endogene Erstarrung durch Legierungszusätze erzielt werden kann, während die

Schalenbildung durch die Vorwärmtemperatur steuerbar ist. Daraufhin kühlte die Küvette an Luft langsam bis auf Raumtemperatur ab, was einer Abkühlgeschwindigkeit von etwa $0,5^{\circ}\text{C}/\text{sec.}$ entspricht. Der Aushärtungsvorgang der aushärtbaren Legierung Degulor MO ist auf die genannte Abkühlgeschwindigkeit abgestimmt, wodurch die sonst notwendige Wärmebehandlung entfällt.

Das Absäuern des Gusses nach dem Ausbetten erfolgte mit 10 %iger Schwefelsäure. Hierzu wurde er in eine Porzellanschale gelegt und frische Schwefelsäure aufgegossen. Das Erwärmen über dem Bunsenbrenner erfolgte über mehrere Minuten bis das Gußteil gleichmäßig metallfarben war. Nach dem Abspülen unter Wasser wurden die Gußkanäle abgetrennt und die Gußproben mit Schmirgelpapier der Körnung 400 bearbeitet.

Um zu gewährleisten, daß nur Proben aus einem Guß miteinander verlötet bzw. verschweißt wurden, erfolgte nun ihre genaue Kennzeichnung; dies vor allem im Hinblick auf die durchzuführenden Ätzungen zur Gefügeuntersuchung und wegen der Korrosionsversuche, da zu erwarten war, daß sie weniger unterschiedliches chemisches Verhalten und weniger unterschiedliche elektrochemische Potentiale aufwiesen. Abschließend sei noch gesagt, daß beim Gießen zu den neuen Gußwürfeln nie mehr als $1/3$ Gewichtsanteil, vor ihrer Wiederverwendung sorgfältig gereinigter Gußkegel und Gußkanäle beigegeben wurde. Hierbei wurde von der Überlegung ausgegangen, daß beim Schmelzen einer Edelmetalllegierung die in ihr enthaltenen Unedelmetalle oxydieren können und durch Abbrand unedler Legierungsbestandteile sich eine Verschiebung der Legierungszusammensetzung ergeben kann.

2.2.3 Gußprobenherstellung der Kobalt-Chrom-Molybdän-Legierung

Bei der thermischen- oder Schmelz-Umformung der Co-Cr-Mo-Legierung wurde auf die Verwendung gebrauchten Materials ganz verzichtet, um deren vorzügliche Eigenschaften nicht zu beeinträchtigen. Da sich die vorbereitenden Maßnahmen

für das auch hier angewandte Wachsausschmelzverfahren in vielen Punkten mit dem bei der Herstellung der Gußproben aus den beiden Edelmetalllegierungen decken, sollen nur die davon abweichenden Fertigungsmethoden, Hilfsmaterialien und Einrichtungen Erwähnung finden. Selbstverständlich wurde mit der größtmöglichen Sorgfalt unter Einhaltung der Verarbeitungsvorschriften gearbeitet (FALCK (17), HALBACH (20), HENKEL (24), HOUDREMANT (28), JANTZEN (29), KEMPIAK (31), SCHOENBECK (48), TOFAUTE (59)).

Die Wachsmodelle für die Platinen erhielten die Größe 20 mm x 10 mm x 1 mm. Anstelle der vorne erwähnten Gußküvette fand eine Plastikmanschette Verwendung, die nach dem Vorhärten der Einbettmasse entfernt wurde. Da der Schmelzpunkt der Legierung bei 1350°C liegt und sie mit 2,4 Volum.-%, im Gegensatz zum Gold mit 1,35 bis 1,5 % eine große Erstarrungs- und Abkühlungskontraktion aufweist, konnte keine Einbettmasse aus der Edelmetalltechnik verwendet werden. Wegen deren zu geringer thermischen Expansion und mangelnder Feuerfestigkeit fand eine Einbettmasse auf Äthyl-Silikat-Basis Verwendung. Das Einbetten erfolgte nach der direkten Methode mittels Rütteltisch und Vakuum mit Multi-Vest Investment. Nach dem Abbinden wurde das Einbettmassemodell für 30 Minuten zum Austrocknen und Ausschmelzen der Wachsanteile in einen auf 250°C aufgeheizten Trockenschrank gestellt. Die Vorwärmzeit betrug 30 Minuten bei 1100°C.

Der sich daran anschließende Guß erfolgte nach der Inducast-Methode mit der elektronischen Hochfrequenzschleuder von Galloni unter Schutzgasatmosphäre. Hierbei schmolz das Metall in einem weitgehend abgeschlossenen Tiegel unter der Verwendung von Hochfrequenzströmen als Wärmequelle bei ständiger Kontrolle der Temperatur durch einen elektrischen Pyrometer ohne Zugabe eines Flußmittels. Nach Erreichen der vorgewählten Temperatur wird die Zentrifuge in Bewegung versetzt. Das Schutzgas Argon wird, durch einen Flußmesser geregelt, mit niedrigem Druck in einer Menge von 1,5 Liter pro Minute über die schmelzende Legierung geführt. Im Gegensatz zu der bisher angewandten Schmelzung mit Lichtbogen oder Sauerstoffgebläse, bietet dieses Verfahren ideale

Sicherung gegen Überhitzung, Oxydation, Aufkohlung und Verschmutzung, womit die vom Hersteller garantierten einwandfreien metallurgischen und mechanischen Eigenschaften der Co-Cr-Mo-Ausgangslegierung erhalten bleiben sollen.

Nach dem Guß wurde das Einbettmassemodell langsam abgekühlt. An das Ausbetten schlossen sich die Säuberung der Gußobjekte mittels eines Sandstrahlgebläses, das Abtrennen der Gußstifte mit hochtourigen Schleifmotor und Spezialtrennscheiben, das Bearbeiten der Proben mit Schmirgelpapier der Körnung 400 und deren sorgfältiges Kennzeichnen an.

2.3 Verbindearbeiten (Löten)

2.3.1 Allgemeines

Unter Löten versteht man ein Verbinden von zwei metallischen Werkstoffen mit Metallen oder Legierungen, die einen niedrigeren Schmelzpunkt als die zu verbindenden Werkstoffe haben. Das Lot soll die Trennfuge ausfüllen und an der Oberfläche haften. Diese Haftung soll durch gegenseitige Diffusion, also Legierungsbildung, verstärkt werden. Die Diffusionszonen sollen sich nicht zu tief erstrecken und möglichst ohne Bildung von Schichten spröder Kristallite verlaufen. Die Wärmeeinwirkung auf die zu verbindenden Teile darf zu keiner störenden und nachhaltigen Herabsetzung ihrer Eigenschaften führen.

Die Wahl der Lote richtet sich nach den mechanischen und chemischen Anforderungen an die Verbindungsstellen. Es sind u.a. Legierbarkeit, Diffusionsgeschwindigkeit und zulässige Temperaturbeanspruchung beim Löten zu berücksichtigen. Hartlote liegen in ihrer Festigkeit wesentlich höher als Weichlote. Aus diesem und vor allem aus Gründen des Korrosionsschutzes werden im Dentallabor fast ausschließlich Hartlote verwendet. Auf die Probenvorbereitung, die Verarbeitung, die Anwendung von Desoxydationsmitteln und die Wärmequelle beim Hartlöten wird im Anschluß näher eingegangen.

2.3.2 Lötung der Dentalgoldlegierungen

Da bei der Lötung der grundlegende Vorgang, die Benetzung, auf einer Reaktion zwischen der Oberfläche des Grundwerkstoffes und dem flüssigen Lot beruht, nimmt die Istoberfläche der Probe auf die Güte der Lötung einen Einfluß.

Es reicht also nicht aus, die geometrisch-ideale Oberfläche allein zu berücksichtigen, da Rillen, Riefen und Kratzer Gestaltabweichungen bedingen. Der Grad der Abweichung, die Oberflächengüte ist in Deutschland in den Normblättern DIN 4760, DIN 4761 und DIN 4762 Blatt 1 bis 3 zusammengestellt. Das löttechnisch wichtigste Maß zur Beurteilung von Gestaltabweichungen ist die Rauhtiefe, die in Mikrometer gemessen wird. Der Rauhtiefenbereich von 1,6 bis 25 μm ist relativ klein gegen die Lötspaltbreite, so daß der kapillare Fülldruck durch ihn nur wenig herabgesetzt wird (COLBUS (4), LOEBICH (37), SCHATZ (47)).

Da es löttechnisch bedeutungslos ist, ob die Rauhtiefe 1 oder 10 μm beträgt, wurde von der Glättung der Oberfläche, zumal sie mit einer Strukturveränderung verbunden sein kann, abgesehen. Eine gewisse Vergrößerung der Oberfläche und die Deformation der Oberflächenzone sollen eine bessere Benetzung ermöglichen. Das Bearbeiten der Gußproben mit Schleifkörpern erfolgte so, daß Rillen, Riefen und Kratzer in Lotflußrichtung verliefen.

Von Schmutz und Fett wurden die Lötobjekte mit Trichloräthylen befreit. Zwei speziell angefertigte Schablonen dienten dazu, Platinen und Rundstäbe in exakten geraden Stoß zu bringen und die Lötstellen gut zu verpassen. So ausgerichtet, wurden die Proben provisorisch mit Klebewachs fixiert. Nach DIN 8505 "ist die Lötstelle der mit Lot auszufüllende Raum zwischen zwei oder mehreren metallischen Werkstücken". Dieser wird größtenteils von den Oberflächen der miteinander zu verbindenden Werkstücke begrenzt. Wenn der Abstand zwischen den zu verlötenden Teilen konstant und nicht größer als 0,5 mm ist, spricht man von "Spaltlöten" und die zugehörige Lötstelle heißt "Lötspalt".

Die günstigste Breite für den Lötspalt liegt, wie umfangreiche Untersuchungen zeigten, zwischen 0,05 und 0,2 mm.

In diesem Bereich wird flüssiges Lot außerhalb des Spaltes, sobald es bei der Benetzung an den Spaltrand kommt, durch den kapillaren Fülldruck, der der Lötspaltbreite umgekehrt proportional ist, in den Spalt hineingetrieben. Der Spalt soll außerdem parallelwandig sein und überall gleichen Querschnitt haben, damit das Fließen des Lotes nicht unterbrochen wird. Bei der hier angestrebten Spaltbreite von 0,1 mm, einem Mittelwert, erreicht der kapillare Fülldruck etwa 100 cm Wassersäule (SCHATZ (47)). Zur Beurteilung des zu erwartenden Füllgrades einer Lötstelle ist die Spaltbreite allein noch nicht ausreichend. Er wird fernerhin maßgeblich beeinflusst vom Fließweg bzw. von der mittleren Füllgeschwindigkeit des Lotes. Bei der hier vorliegenden kleinen Spaltbreite und geringen Spalttiefe, war ein hoher Füllungsgrad von 80 % oder mehr zu erwarten.

Das lötgerechte Konstruieren ist demnach eine Voraussetzung für optimale Lötungen.

Zum Einbetten der provisorisch fixierten Prüfkörper wurden nun 25 g Pulver der Loteinbettmasse Deguvest L, deren Dimensionsänderungen der thermischen Expansion der eingebetteten Legierungen Degulor B und Degulor MO während des Lötprozesses entspricht, mit 7 ml destilliertem Wasser angerührt.

Darin wurden die Proben fixiert, nicht eingebettet, um durch weites Freiliegen des Lötspaltes beim Lötprozeß möglichst geringe Temperaturverluste hinnehmen zu müssen. Nach 25 Minuten Abbindezeit erfolgte das Ausbrühen des Fixierungswaxes und das Bestreichen des Lötspaltes mit reichlich Flußmittel H, einer Lötpaste für Edelmetallote deren Arbeitstemperatur zwischen 500 und 800°C liegt. Das Flußmittel schmilzt zwischen 400 und 500°C und ist aus Borsäure, Fluoriden und einem Netzmittel zusammengesetzt.

Nach DIN 8505 sind "Flußmittel nichtmetallische Stoffe, die unter der Voraussetzung, daß die Werkstoffoberflächen ausreichend vorgereinigt sind, Oberflächenfilme beseitigen können, durch die das Lot am Benetzen der Werkstücke gehindert wird; auch können sie erneute Bildung von Oberflächenfilmen verhindern". Sie müssen mindestens 50°C tiefer schmelzen als die Lote für die sie bestimmt sind, da sie die Löt-

flächen bereits zum Löten vorbereitet haben müssen, bevor das Lot schmilzt. Die Edelmetalllegierungen und Lote, die in der Zahntechnik Anwendung finden, enthalten geringe Mengen von Unedelmetallen, die beim Erhitzen auf Arbeitstemperatur Oxydschichten ausbilden. Die Zähigkeit des oxydlösenden Flußmittelüberzuges muß im Wirkungsbereich so groß sein, daß er bei der erforderlichen Löttemperatur und Lötzeit erhalten bleibt und gleichzeitig so niedrig, daß sich ein möglichst vollständiger Platzwechsel zwischen Flußmittel und Lot im engen Lötspalt ergibt (1 - 10 Poise).

Der Lötmasseblock wurde im Vorwärmofen vorgetrocknet und dann 10 Minuten lang bei 600°C vorgewärmt. Nach der Entnahme aus dem Ofen wurde das Werkstück an der Lötstelle und seiner Umgebung mit der Leuchtgas-Preßluft-Lötpistole mit nicht zu scharfer Flamme bis auf die Arbeitstemperatur des Lotes erhitzt. Erst dann wurde mit einem Lothalter flußmittelbenetztes Degulor 1 Bandlot beigegeben. Nach dem Fließen des Lotes wurde nicht weiter erhitzt. Es wurde streng darauf geachtet, daß der Lötprozeß in dem Bereich "minimale - maximale Lötzeit" stattfand, der einerseits von der Zeit, die das Flußmittel für die Reinigung der Spaltoberflächen benötigt und andererseits von der Dauer des Lösungsvermögens des Flußmittels für Metalloxyde, begrenzt ist.

Das zum Aushärten mit Asbestpappe abgedeckte Werkstück wurde an Luft langsam abgekühlt und nach dem Ausbetten mit heißer 10 %iger Schwefelsäure von Flußmittelresten und Oxyden befreit.

2.3.3 Lötung der Kobalt-Chrom-Molybdän-Legierung und des Kobalt-Chrom-Nickel-Drahtmaterials

Bei den nun zu besprechenden Hartlötungen mit Oberhitze der Kobalt-Chrom-Molybdän-Gußlegierung und des Kobalt-Chrom-Nickel-Drahtmaterials gilt in vielen Punkten das bei den Lötungen der Goldlegierungen Gesagte. Hier sollen deshalb nur die davon abweichenden Arbeitsvorgänge und Materialien Erwähnung finden.

Nach Reinigung der Lötobjekte durch Absäuern mit 6 %iger Salzsäure und deren Fixierung in Lötteinbettmasse wurde nach 30 Minuten Abbindezeit der Lötmasseblock getrocknet, aber wegen der Gefahr des Verzunders der Metalloberfläche nicht im Ofen vorgewärmt. Nun wurde der Lötspalt mit reichlich Degussa-Flußmittel S in Pastenform vollständig abgedeckt. Dies ist ein Bor-Verbindungen enthaltendes Flußmittel für Wirktemperaturen ab 700°C zum Verarbeiten von Hartloten mit einer Arbeitstemperatur oberhalb 800°C. Eine mäßig heiße Flamme (200 - 300°C) brachte es nun so zum Schmelzen, daß eine glasartige Decke den ganzen Lötbereich abdeckte und vor Oxydation schützte. Erst jetzt wurde das ebenfalls mit Flußmittel bedeckte Bandlot DWL 801 aufgebracht.

Als Lote sind hier nur Legierungen geeignet, die in ihrem Potential dem des Stahles nahe stehen, so daß die im Elektrolyten entstehenden Spannungen zur Korrosionsbildung nicht ausreichen (nach SCHÖNBECK (48) Werte von 0,04 bis 0,05 Volt). Unter dieser Voraussetzung haben sich nur Goldlote mit mehr als 18 Kar. bewährt.

Da die Arbeitstemperatur des Lotes mit 930°C relativ hoch liegt, wurde die Lötung mit offener Flamme mittels des Brenners nach FEHR durchgeführt, der Leuchtgas und Sauerstoff in einer neutralen kohlenstofffreien, sehr heißen und spitzen Flamme verbrennt. Hiermit wurde die Lötstelle nun möglichst rasch lokal soweit erhitzt, daß das Lot zum Schmelzen kam und schließlich ca. 100°C oberhalb seines Schmelzpunktes in die Lötspalte verschoß. Um zu verhindern, daß die scharfe Flamme die unabgedeckte Oberfläche des Lötobjektes treffen konnte, wurde streng darauf geachtet, daß bei den hohen Temperaturen die Flußmitteldecke nicht zerstört wurde. Nach der Lötung wurde mit kaltem Wasser abgeschreckt und ausgebettet. Die Flußmittelreste konnten mit erwärmter 10 %iger Schwefelsäure abgebeizt werden.

2.4 Beschreibung der Prüfkörper

Nachdem nun jeweils zwei der in Tabelle 10 angegebenen Gußproben durch Lötung thermisch verbunden waren, ergaben sich die in Tabelle 11 aufgeführten und in Bild 1 dargestellten Prüfkörper. Es sei hier noch einmal darauf hingewiesen, daß nur Proben aus einem Guß miteinander verlötet wurden. Zusätzliche Prüfkörper ergaben sich dadurch, daß 4 Rundstäbe der Kobalt-Chrom-Molybdän-Legierung mit dem Kobalt-Chrom-Nickel-Drahtmaterial "Redur" gleicher Abmessung ($\varnothing$ 1,5 mm, Länge 25 mm) verlötet wurden.

Da es sich hier um ein thermisches Verbindungsproblem einer Gußlegierung mit einem halbharten Drahtmaterial - zwei in ihren Eigenschaften völlig verschiedenen Legierungen - handelt, das sich auch im Dentallabor häufig stellt, erschien die Einbeziehung in die nun folgenden Versuchsreihen ratsam.

Dentallegierung	Art des Versuchs- körpers	Abmessung in mm	Lötungen Anzahl
Degulor B	Platine	20 x 10 x 1	4
	Rundstab	Länge 50, $\varnothing$ 1,5	4
Degulor MO	Platine	20 x 20 x 1	4
	Rundstab	Länge 50, $\varnothing$ 1,5	4
Kobalt-Chrom Molybdän	Platine	20 x 20 x 1	4
	Rundstab	Länge 50, $\varnothing$ 1,5	4
Kobalt-Chrom- Molybdän und Kobalt-Chrom- Nickel ("Redur")	Rundstab	Länge 50, $\varnothing$ 1,5	4

Tab. 11: Legierung, Abmessungen und Anzahl der gelöteten Prüfkörper

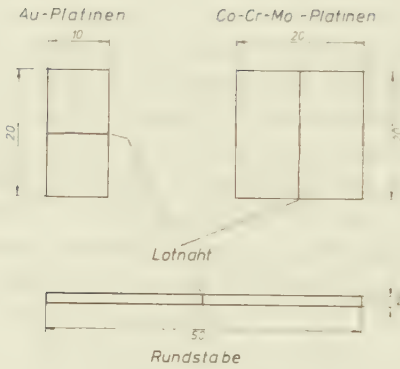


Bild 1 Die 3 Arten der Prüfkörper (Maßstab 1:1)

Die Bilder 25 und 26 (siehe Bildanhang) zeigen eine Lotnaht der Co-Cr-Mo Platinen in geätztem Zustand bei 18-facher Vergrößerung, das Bild 27 eine solche in ungeätztem Zustand bei 11-facher Vergrößerung.

3. DURCHFÜHRUNG UND ERGEBNISSE DER VERSUCHE

3.1 Röntgengrobstrukturuntersuchung

3.1.1 Allgemeines

Die Röntgengrobstrukturuntersuchung ist eine zerstörungsfreie Prüfmethode, die häufig als Qualitätskontrolle, insbesondere an gegossenen oder thermisch verbundenen Werkstücken, angewendet wird. Sie ermöglicht das Auffinden von Fehlern wie Poren, Gasblasen, Lunkern und Rissen. Aber auch Fremdeinschlüsse werden aufgrund ihres unterschiedlichen Schwächungskoeffizienten abgebildet.

Das zu untersuchende Werkstück wird zwecks Erzeugung eines Schattenbildes durchstrahlt. Dabei wird die Strahlung in ihrer Intensität vermindert. Es gilt

$$I = I_0 e^{-\mu d} \quad [1]$$

Dabei ist d die Dicke des Werkstückes, I_0 die Intensität der auffallenden Strahlung, I die austretende Strahlung und μ der Schwächungskoeffizient. Die Intensität der austretenden Strahlung ist somit eine Funktion der Dicke des Werkstückes und der Dichte des durchstrahlten Materials. μ setzt sich aus dem Absorptionskoeffizienten U und dem Streukoeffizienten σ zusammen.

$$\mu = U + \sigma \quad [2]$$

Liegt im Werkstück ein Fehler vor, so wird die Intensität der austretenden Strahlung aufgrund der unterschiedlichen Schwächungskoeffizienten verschieden stark vermindert. Je größer der Dichtenunterschied zwischen gesundem Werkstoff und Fehler ist, desto ausgeprägter wird der Unterschied.

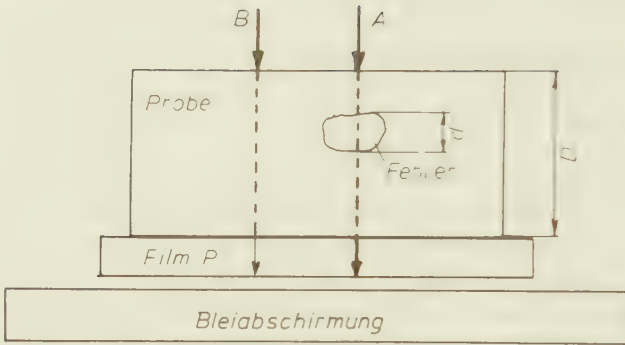


Bild 2 Schematische Darstellung der Fehlererkennbarkeit bei der Grobstrukturuntersuchung

Bild 2 zeigt schematisch ein Werkstück der Dicke D , in dem sich ein Fehler mit der Dicke d befindet. Das Verhältnis der Intensität I_1 eines Röntgenstrahles (B) der den Fehler nicht berührt, zu der eines Strahles (A) der durch den Fehler geht, beträgt

$$I_1 : I_2 = e^{-(\mu_M \mu_F) D} \quad [3]$$

Dabei ist μ_M der Schwächungskoeffizient im Metall
 μ_F der Schwächungskoeffizient im Fehler
 D die Dicke des metallischen Werkstückes
 d der Durchmesser des Fehlers

Die Intensitätsunterschiede äußern sich in einer unterschiedlichen Schwärzung des Filmes P, der am Werkstück anliegt und damit die Größe des Fehlers direkt wiedergibt. Von der Bildgüte hängt die Fehlererkennbarkeit ab. Sie wird durch hohen Kontrast und geringe Bildunschärfe erreicht.

Besonderes Augenmerk beim Umgang mit Röntgenanlagen jeder Art ist dem Strahlenschutz zuzuwenden, da bei Überdosen

starke Schädigungen des menschlichen Organismus eintreten können. Behördliche Strahlenschutzvorschriften für die Industrie sind im Normblatt DIN 54 113 enthalten. Die Wochen-dosis an Plätzen, an denen sich Personen aufhalten, darf z.B. 0,3 r nicht überschreiten. Jede Person, die in Räumen mit Röntgenanlagen oder in deren näherer Umgebung arbeitet, muß mit Strahlendosimetern ausgerüstet sein, die in bestimmten Zeiträumen kontrolliert werden müssen.

3.1.2 Beschreibung des Röntgengerätes

Für die Grobstrukturuntersuchungen an den gelöteten Drähten bzw. Platinen stand die Röntgeneinheit Eresco-Industrie (Fa. Rich. Seifert & Co. Ahrensburg, 200 k V, 5 m A) zur Verfügung. Als Filmmaterial fanden Röntgenfilme der Firma Agfa-Gevaert (Typ Structurix D 4 Pb, Format 10 x 48 cm) Verwendung. Der Film-Focus-Abstand betrug 700 mm.

In Tabelle 12 sind alle untersuchten Proben mit den zugehörigen Gerätebedingungen aufgeführt. Außerdem wird eine Beurteilung der Verbindungsart abgegeben, da die in der Arbeit gezeigten Bilder (Bild 18 - 24) Kopien der Röntgen-negative sind. Die Auswertung von Röntgenaufnahmen soll jedoch grundsätzlich nur am Filmnegativ direkt erfolgen, da durch Kopieren feinere Einzelheiten verlorengehen können.

Proben Bez. und Anzahl	Verbindung von	Proben Form	Verbindung		Gerätedaten		Beurteilung des Gusses	Beurteilung der Verbindung
			Art	kV	Spannung mA	Strom s		
WL 4	Co-Cr-Mo- Co-Cr-Mo	Platine	Lötung	100	5	45	wenig Poren oder Lunker	gut
WL 4	Co-Cr-Mo- Co-Cr-Mo	Platine	Lötung	200	5	20	einzelne Poren bei einer Probe oder Lunker	Pore an Lotnaht
WL 4	Co-Cr-Mo- Klammer- draht oben	Draht	Lötung	200	5	20	einzelne Poren vereinzelte Aufblä- oder Lunker	lungen a.d. Lotnähten
BL 4	Degulor B- Degulor B	Platine	Lötung	200	5	60	große Poren oder Lunker	große Poren im Bereich der Lotnaht
BL 4	Degulor B- Degulor B	Draht	Lötung	200	5	60	gut	gut
MoL 4	Deg-Mo- Deg-Mo	Platine	Lötung	200	5	60	gut	an 2 Proben Fehler im Bereich der Lötung
MoL 4	Deg-Mo- Deg-Mo	Draht	Lötung	200	5	60	gut	gut

Tab. 12: Probenbezeichnung, Gerätedaten und Beurteilung der Werkstücke

3.1.3 Ergebnisse

An den Bildern 18 bis 24 (Bilder 18 - 67 siehe Bildanhang) ist zu erkennen, daß die Röntgenuntersuchung an den hier verwendeten Proben nicht ganz unproblematisch war. Während die Platinen der Co-Cr-Mo-Lötungen verhältnismäßig gut abgebildet werden, war es äußerst schwierig, alle Drähte und die Goldplatinen so zu durchstrahlen, daß sie ein gleichmäßig geschwärztes Bild mit gutem Fehlerkontrast ergaben. Dies ist bei den Drähten auf die zum Rand hin abnehmende Dicke zurückzuführen, während bei den Goldproben der Schwächungskoeffizient eine Rolle spielt. An Bild 18 ist zu erkennen, daß die Co-Cr-Mo-Proben, abgesehen von leichten Aufhellungen, die vereinzelte Lunker oder Poren anzeigen, sehr homogen sind, was für eine gute Gießbarkeit des Werkstoffes und genaue Durchführung der Gußvorschriften spricht. Die Lotnähte heben sich aufgrund ihres andersartigen Werkstoffes vom Co-Cr-Mo ab, sind aber mit Ausnahme einer einzigen Pore (Bild 18 Platine I) ohne erkennbaren Fehler. Bei den Goldplatinen ergibt sich ein deutlicher Unterschied. Während die Degulor MO Platinen (Bild 23) im Röntgenbild fast keine Hohlräume erkennen lassen, sind einige Degulor B Proben (Bild 21) mit zahlreichen Poren belegt, die z.T. Durchmesser von 0,6 mm erreichen. Da die Gieß- und Abkühlbedingungen bei allen Proben genau nach den Angaben der Hersteller eingehalten wurden, läßt sich der Schluß ziehen, daß die Degulor B Legierung aufgrund ihrer Zusammensetzung schwieriger zu verarbeiten ist als Degulor MO.

Die Lötverbindungen von Degulor MO zeigen nur bei einer Probe eine Pore (Bild 23 Platine IV).

Bei den Degulor B Platinen dagegen sind die Nähte der Lötungen in 3 Fällen von größeren Hohlräumen durchsetzt, die sich vorzugsweise am Rande befinden (Bild 21 Platine I-III).

Es ist naturgemäß nicht möglich, zu unterscheiden, welche Poren im Bereich der Nähte von der Verbindearbeit und welche vom Guß herrühren. Aus der regellosen Verteilung beim

Degulor B läßt sich jedoch eher auf Hohlräume, die vom Guß herrühren, schließen.

Alle Rundstäbe (Bilder 19, 20, 22, 24) lassen im Röntgenbild mit wenigen Ausnahmen keine Fehler erkennen. Das liegt wohl in erster Linie an der Probengeometrie, d.h. ein Rundstab von 1,5 mm Dicke läßt sich offensichtlich leichter gießen als Platinen. Auch die Lotnähte zeigen keinerlei Unregelmäßigkeiten. Hier zeigt sich jedoch die Grenze der Röntgengrobstrukturuntersuchung. Bei den in Kapitel 3.2 beschriebenen Zugversuchen stellt sich nämlich heraus, daß die gelöteten Proben oft nicht über die gesamte Querschnittsfläche mit Lot benetzt waren, d.h. daß der Lotspalt nicht überall ausgefüllt war. Dies ist auf den Röntgenbildern nicht zu erkennen, da die Lotspaltbreite von ca. 0,1 mm unter der Fehlererkennbarkeit durch die Röntgengrobstrukturuntersuchung liegt.

3.2 Zugversuche

3.2.1 Allgemeines

Der Zugversuch an Spaltlötverbindungen mittels Hartloten (DIN 8525, Blatt 1, März 65) für NE-Metalle unterscheidet sich vom Zugversuch an homogenen Werkstoffen vor allem dadurch, daß aus ihm nur die Bruchspannung σ_B ermittelt wird, wenn die Zugrichtung quer zur Lotnaht liegt. Das Ermitteln von Dehngrenzen ($\sigma_{0,2}$) oder der Bruchdehnung δ setzt nämlich einen gleichmäßigen Werkstoffzustand über die gesamte Versuchslänge voraus. Die hier untersuchten Zugstäbe sind in der Mitte gelötet; auf die Lötzone folgt symmetrisch nach beiden Seiten die Wärmeeinflußzone, daran schließt sich der unveränderte Grundwerkstoff an.

Im Zugversuch werden die Proben einer einachsigen, über den Querschnitt gleichmäßig verteilten Zugbeanspruchung ausgesetzt. Die Probe wird dabei einer langsam und stetig zunehmenden Dehnung unterworfen, wobei die dazu erforderliche Kraft F gemessen wird. Im allgemeinen werden genormte Proben

verwendet. Aus schon genannten Gründen mußten in dieser Arbeit kürzere bzw. dünnere Proben Verwendung finden. Die DIN-Vorschriften über die Versuchsdurchführung wurden jedoch sinngemäß auf die in Tabelle 11 beschriebenen Rundstäbe angewendet.

Zeichnet man im Zugversuch die Längenänderung Δl der Probe in Abhängigkeit von der Zugkraft F auf, so erhält man ein Kraft-Verlängerungs-Diagramm (Bild 3).

Am Anfang steigt die Last proportional der Dehnung steil an. Dieser Teil des Diagramms wird als Hook'sche Gerade bezeichnet. Die Dehnung in diesem Bereich ist rein elastisch und geht nach Entlastung wieder vollständig zurück.

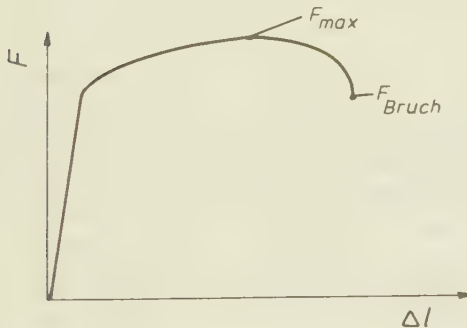


Bild 3 Kraft-Verlängerungs Diagramm

Belastet man die Probe weiter, so geht die Gerade in eine Kurve über, die bis zum Höchstpunkt F_{max} ansteigt, und daraufhin wieder abfällt, bis die Probe im Punkt F_{Bruch} zerstört wird. Der Endpunkt der Geraden wird als Streckgrenze $\tilde{\sigma}_S$ bezeichnet und gibt diejenige Spannung an, bis zu der ein Werkstoff belastet werden kann, ohne daß bleibende Dehnung auftritt.

3.2.2 Versuchsdurchführung

Die Zugversuche wurden auf einer elektronischen Zugprüfmaschine vom Typ Testatron (Fa. Otto Wolpert GmbH, Ludwigshafen) durchgeführt. Sie entsprach der Genauigkeitsklasse I nach DIN 51220. Die Kraftmessung erfolgte mit einer elektronischen Kraftmeßdose mit den Meßbereichen 2, 5, 10 kN. Die Probenlängung wurde mit induktiven Wegaufnehmern gemessen. Beide Geber steuerten eine Schreibvorrichtung in der x- bzw. y-Richtung. Von jeder Dentallegierungsart standen 4 Proben zur Verfügung. Für alle Proben betrug die Belastungsgeschwindigkeit $5 \text{ N/mm}^2/\text{s}$. Vor dem Versuch wurden die Durchmesser mittels Mikrometer auf $1/100 \text{ mm}$ genau bestimmt. Für die Einspannung in die Zugprüfmaschine kamen gekerbte Beißbacken zur Anwendung.

3.2.3 Ergebnisse

Da zum Qualitätsvergleich zwischen den gelöteten Proben aus schon genannten Gründen nur die Zugfestigkeit σ_B herangezogen werden sollte, genügte es für die Auswertung, den Diagrammen den Wert $F_{\max}$ zu entnehmen.

Die Zugfestigkeit σ_B errechnet sich aus der Höchstlast $F_{\max}$ bezogen auf den Anfangsquerschnitt A_0 .

$$\sigma_B = \frac{F_{\max}}{A_0} \left[\text{N/mm}^2 \right] \quad [4]$$

Außerdem sollen nach DIN 8525, Blatt 1, März 65, im Prüfbericht folgende Punkte aufgeführt werden:

1. Anzahl der Proben
2. Daten des Grundwerkstoffes
3. Lötwerkstoff
4. Verwendetes Flußmittel
5. Zeitdauer von Beginn des Anwärmens bis Beendigung des Nachwärmens
6. Probendurchmesser

7. Zugfestigkeit der Verbindung, Einzelwert und Mittelwert
8. Lage des Bruches (in der Lötstelle oder im Grundwerkstoff)
9. Bei Bruch in der Lötstelle Art und Größe sichtbarer Lötfehler

Da mehrere dieser Punkte bereits im Text beschrieben wurden, sind in Tabelle 13 Anzahl, Durchmesser, Zugfestigkeit, Lage des Bruches und evtl. im Bruch erkennbare Lötfehler aufgeführt.

Werkstoff bzw. Verbindungsart	$\tilde{\sigma}_B$ (N/mm ²)	δ (%)	Bemerkung	$\tilde{\sigma}_B$ Mittelwert (N/mm ²)
Co-Cr-Mo	670	-	Bei Probe 2,3,4	
Klammerdraht	369	-	Lötung nicht über	
Lötung	491	-	d. ganzen Fläche	522
	559	-		
Co-Cr-Mo	538	0,7	Bruch nicht	
Lötungen	433	-	an Lötnaht	
	686	3,0		505
	365	-		
Degulor MO	371	1,3		
Lötungen	295	1,7		
	263	1,0		290
	231	-		
Degulor B	279	7,3		
Lötungen	275	10		
	232	2,7		254
	232	4,7		

Tab. 13: Zugversuche an Co-Cr-Mo, Co-Cr-Mo + Co-Cr-Ni, sowie Degulor B und -MO Lötungen

In Bild 4 sind die $\bar{\sigma}_B$ -Mittelwerte sowie als Streubereich der größte und kleinste $\bar{\sigma}_B$ -Wert graphisch aufgetragen.

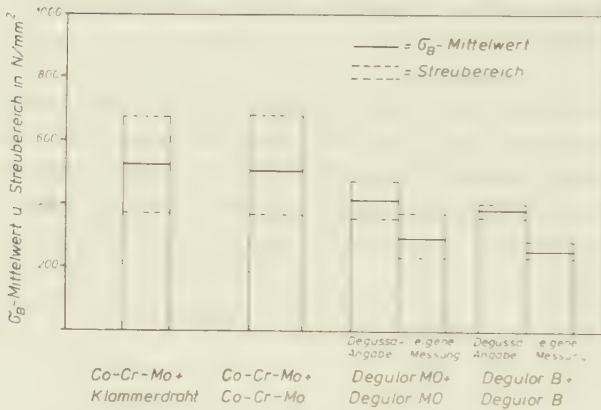


Bild 4 Graphische Darstellung der Zugfestigkeit (eigene Versuche).
Bei Degulor MO und -B verglichen mit Degussa Werksangaben (8).

Aus Tabelle 13 und Bild 4 geht eindeutig hervor, daß bei allen vier Werkstoffkombinationen die Zugfestigkeit der Lötungen eine erhebliche Streubreite aufweist. So schwanken die $\bar{\sigma}_B$ -Werte bei den Co-Cr-Mo-Klammerdraht Prüfkörpern zwischen 670 und 369 N/mm² (Mittelwert 522 N/mm²), bei den Co-Cr-Mo Proben zwischen 686 und 365 N/mm² (Mittelwert 505 N/mm²), bei den Degulor MO Proben zwischen 371 und 231 N/mm² (Mittelwert 290 N/mm²) und bei den Degulor B Prüfkörpern zwischen 279 und 232 N/mm² (Mittelwert 254 N/mm²). Das zeigt, daß die Lötbarkeit in der Praxis nicht sehr hoch ist, obwohl sämtliche Vorschriften bezüglich Spaltbreite, Oberflächenvorbereitung, Flußmittel und Wärmeleitung exakt eingehalten wurden. Außerdem zeigte die Betrachtung der Bruchflächen, die mit einer Ausnahme immer im Bereich der Lotnaht lagen, daß der erwartete Füllungsgrad (80 % und darüber) nicht immer zu erreichen war. Die ins-

gesamt höhere Festigkeit der mit dem Stahl-Goldlot DWL 801 gelöteten Kobalt-Basislegierungen ist vor allem auf die andersartige Zusammensetzung des genannten Lotes zurückzuführen (Tab. 9).

Ein Vergleich mit den Degussa Werksangaben (Tab. 8) zeigt, daß die $\bar{\sigma}_B$ -Werte der eigenen Lötungen beim Degulor B mit 254 N/mm² um ca. 34 % und beim Degulor MO mit 290 N/mm² um 31 % niedriger lagen. Bezüglich der Streubreite der Zugfestigkeit der Lötverbindungen decken sich die eigenen Ergebnisse mit den in Tab. 8 gemachten Angaben.

3.3 Härtemessungen

3.3.1 Allgemeines

Unter Härte versteht man den Widerstand, den ein Werkstoff dem Eindringen eines härteren Prüfkörpers entgegensetzt. Es gibt eine größere Anzahl von Härteprüfverfahren, von denen die Wichtigsten die Prüfung nach VICKERS, BRINELL und ROCKWELL sind.

Da nur das Prüfverfahren von VICKERS Belastungen bis in den Bereich von wenigen Pond ermöglicht, wurden in der vorliegenden Arbeit alle Härtemessungen nach VICKERS (DIN 50133) durchgeführt.

Die Vickershärte ist definiert als

$$HV = \frac{\text{Prüflast } F}{\text{Oberfläche des Eindruckes } A} \quad (\text{N/mm}^2) \quad [5]$$

Als Prüfkörper dient eine regelmäßige Diamantpyramide mit quadratischer Grundfläche. Der Öffnungswinkel der Pyramide beträgt 136°.

Die Diamantpyramide wird senkrecht in das zu untersuchende Werkstück mit einer vorgegebenen Prüflast F gedrückt. Die Abmessungen des quadratischen Eindruckes können als Maß für die Härte benutzt werden. Je größer der Eindruck, desto kleiner ist die Härte. Zur Ermittlung der Oberfläche A des

Eindruckes wird die Diagonale d in mm verwendet.

$$A = \frac{d^2}{2 \cdot \cos 22^\circ} = \frac{d^2}{1,8544} \text{ (mm}^2\text{)} \quad [6]$$

Daraus folgt:

$$HV = \frac{F}{A} = \frac{F \cdot 1,8544}{d^2} \quad [7]$$

Die Eindrücke, die mit den verschiedensten Prüflasten erzeugt werden, sind geometrisch ähnlich. Es können daher Ergebnisse verglichen werden, die mit verschiedenen Lasten ermittelt worden sind.

3.3.2 Versuchsdurchführung

Für die Härtemessungen stand der Kleinlasthärteprüfer Durimet (Firma E. Leitz, Wetzlar) zur Verfügung, der Belastungen von 15 p - 300 p ermöglicht.

Die Prüflast wurde in ca. 15 s stoßfrei aufgebracht und ca. 30 s auf ihrem Höchstwert belassen. Die Eindrücke lagen in der Mitte der Probe und nach beiden Seiten im gleichen Abstand von der Lötnaht in einer Reihe. Der Abstand zwischen zwei benachbarten Eindrücken betrug mindestens das 3-fache einer Eindrucksdiagonale (siehe Bild 5).



Bild 5 Abstand der Eindrücke von der Naht

Zwischen der Co-Cr-Mo-Legierung und den Au-Legierungen waren wesentliche Härteunterschiede zu erwarten. Damit bei beiden Werkstoffen annähernd gleich große Eindrücke und damit gleich große Abstände von der Lötnaht realisiert werden konnten,

wurden die Co-Cr-Mo-Legierung mit der Belastung 200 p, die Au-Legierungen mit 50 p geprüft.

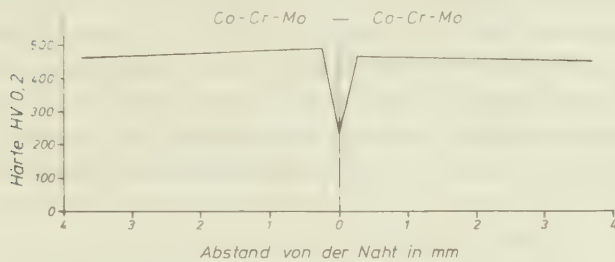


Bild 6 Härteverlauf der Co-Cr-Mo-Platinen

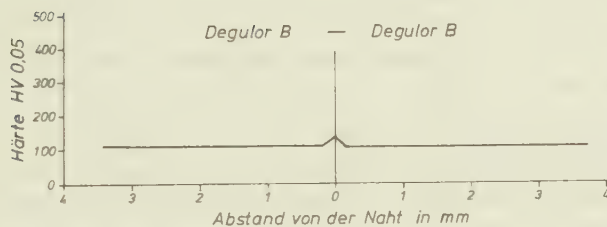


Bild 7 Härteverlauf der Degulor B-Platinen

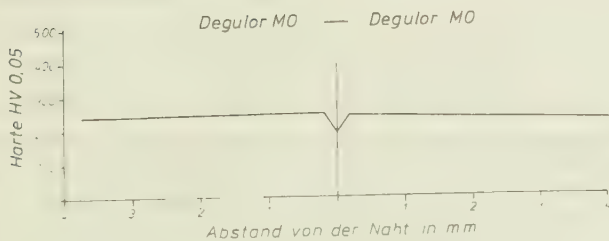


Bild 8 Härteverlauf der Degulor MO-Platinen

Es standen pro Legierung je 4 Platinen zur Verfügung. Die Oberflächen der Proben waren fein poliert; außerdem wurde auf eine plane Auflage geachtet. Der Kreutztisch des Härteprüfers erlaubte es, die Proben in zwei Richtungen mittels Mikrometerschraube zu verschieben und die Abstände der Ein-drücke genau zu bestimmen. Die Ermittlung der Härtewerte erfolgte aus Tabellen, die für die gängigsten Belastungsstufen für die jeweiligen Diagonalen bereits fertig errechnet vorlagen.

3.3.3 Ergebnisse

Die Härtemessungen sollten darüber Auskunft geben, ob in der unmittelbaren Umgebung oder auch in größerem Abstand von der Lotnaht durch die zugeführte Wärme bzw. durch die Abkühlbedingungen Veränderungen auftreten, die eine Verminderung oder Steigerung der Härte und damit der Festigkeit ergeben.

Aus den Härtewerten der 4 Proben jeder Legierungsart wurde ein Mittelwert gebildet. In den Bildern 6, 7, 8 sind die Mittelwerte in Abhängigkeit des Abstandes von der Lotnaht aufgetragen.

Bei den Co-Cr-Mo-Lötverbindungen liegt die Härte des Goldlotes wesentlich niedriger als die der Co-Cr-Mo-Platinenhälften (Bild 6). Ein Einfluß auf den Härteverlauf in den Platinenhälften durch die Lötung ist nicht feststellbar. Schwankungen von 20 - 30 HV-Einheiten sind bei Gußproben aufgrund von Inhomogenitäten zu erwarten.

Bei den Degulor B-Verbindungen ist der Härteverlauf durch eine Gerade gekennzeichnet; selbst die Härte der Lotnaht unterscheidet sich nur unwesentlich von der der Platinen, da sie ja aus annähernd demselben Werkstoff besteht (Bild 7). Ein Einfluß durch die Erwärmung und Abkühlung beim Löten ist hier nicht zu erwarten, da es sich um eine nicht aushärtbare Legierung handelt.

Degulor MO stellt im Gegensatz dazu aufgrund seiner Zusam-

mensetzung diese aushärtbare Legierung dar. Hier hängt die erzielbare Härte sehr stark von den Abkühlbedingungen ab. Die Lötverbindungen von Degulor MO besitzen mit Ausnahme der Naht, die etwas weicher ist, wieder einen geradlinigen Härteverlauf (Bild 8). Das ist vor allem darauf zurückzuführen, daß nach dem thermischen Verbindungsprozeß langsam abgekühlt wurde, wodurch ein Aushärten des Platinenwerkstoffes möglich war.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die Verbindungsarbeiten bei den Co-Cr-Mo-, Degulor B- und Degulor MO Platinen praktisch keinen Einfluß auf den Härteverlauf der Proben zeigten.

3.4 Metallographische Untersuchungen

3.4.1 Allgemeines

Die Metallographie ist das Teilgebiet der Metallkunde, das sich mit dem Zusammenhang zwischen den Zustandsdiagrammen, dem Gefügebautbau und den Eigenschaften der Metalle und Legierungen befaßt.

Ziel der Metallographie ist es, aus dem Gesamtbild der makro- und mikroskopisch sichtbaren Gefügestruktur heraus, Verhalten und Eigenschaften eines Werkstoffes vorauszubestimmen und den günstigsten Gefügezustand für den jeweiligen Verwendungszweck anzugeben.

In der vorliegenden Arbeit wurden die metallographischen Untersuchungen durchgeführt, um aus dem Gefügezustand der gelöteten Proben Rückschlüsse auf die Eignung der verwendeten Legierungen zum thermischen Verbinden ziehen zu können.

Die metallographische Untersuchung von Lötverbindungen und deren Beurteilung erfordern metallkundliche sowie hüttenmännische Kenntnisse und setzen einige Erfahrung voraus.

Dabei soll versucht werden, anhand vorhandener Zustandsdiagramme Erscheinungen wie Gußgefüge, Seigerungen, überhitztes-, heterogenisiertes-, homogenisiertes- und rekristall-

siertes Gefüge zu erklären, um so Aufschluß über die Qualität der Verbindung, die Wärmeleitung, die Abkühlbedingungen, die Wahl der richtigen Reduktionsmittel usw. zu gewinnen. Außerdem ist zu klären, ob Höhe und Einflußzeit der Temperatur richtig gewählt waren, um Diffusion zu ermöglichen und damit eine haltbare Verbindung herzustellen.

3.4.2 Schliffherstellung

Die Co-Cr-Mo und Au-Ag-Cu-Platinen wurden in der Mitte senkrecht zur Naht durchtrennt und an ihrer Schmalseite untersucht. Zur besseren Handhabung wurden alle Proben in Araldit-Gießharz kalt eingebettet. Für beide Werkstoffe kam Naßschleifen zur Anwendung, wobei Siliziumkarbidpapier der Körnungen 120, 240, 320, 400, 600 unter fließendem Wasser verwendet wurde. Vor- und Feinpolieren erfolgte an beiden Werkstoffen mit Diamantpasten der Körnungen 7 μ , 3 μ , 1 μ . Lediglich bei den Goldlegierungen mußte zur Entfernung der letzten Kratzer ein Schlußpolieren mit Samttuch und Tonerde Nr. 3 angewendet werden.

Zur Sichtbarmachung der Gefüge kamen folgende Ätzmittel zur Anwendung:

Ätzmittel für Co-Cr-Mo-Legierungen (Krupp-Labor Mitteilung).

465	cm ³	H ₂ O	dest.
465	cm ³	HCL	konz.
46,5	cm ³	HNO ₃	konz.
22,1	cm ³	H ₂ SO ₄	konz.
1,2	cm ³	Vogel'sche Sparbeize	

Die Ätzdauer betrug 10 - 15 s bei einer Ätzmitteltemperatur von 60°C. Ätzmittel für Au-Ag-Legierungen (aus Beckert-Eleum. Handbuch der metallorg. Ätzverfahren (1)).

Verdünntes Königswasser:

2	Teile	HCL	
1	Teil	HNO ₃	
3	Teile	H ₂ O	dest.

Ätzdauer ca. 20 - 30 s bei 30°C. Zur Entfernung des Chlorsilbers wurde anschließend in Ammoniak getaucht.

oder: Elektrolytische Ätzung in verdünnter Lösung von
 H_2O dest + HCL + Kaliumzyanid + Kaliumjodid

Die so erhaltenen Gefügebilder sollen nun anhand der Zustandsdiagramme diskutiert werden.

3.4.3 Deutung der Gefügeerscheinungen bei der Co-Cr-Mo-Legierung

Co-Cr-Mo-Legierungen mit der in der Zahnheilkunde üblichen Zusammensetzung sind reine Gußlegierungen, die sich durch ihre hohe Festigkeit und Härte sowie vor allem durch gute Korrosionsbeständigkeit auszeichnen. Der hohe Kobalt-Anteil bewirkt, daß die Schmelze sehr dünnflüssig wird, d.h. daß auch komplizierteste Formen mit großen Wanddickenunterschieden ohne weiteres ausgegossen werden können. Trotz der hohen Festigkeit und Härte besitzt die Legierung noch eine Dehnung von 10 %, so daß kleinere Richtarbeiten am Gußteil durchaus durchgeführt werden können.

Auf die hohe chemische Beständigkeit wird in Kapitel 3.6 noch näher eingegangen werden.

Für Co-Cr-Mo-Legierungen ist ein ternäres Zustandsdiagramm nur für 1200 bzw. 1300°C bekannt (Cobalt Monograph (3)). Für Betrachtungen bei RT müssen die binären Systeme Co-Cr, Co-Mo, Cr-Mo herangezogen werden. Diesen 3 Zustandsdiagrammen ist gemeinsam, daß eine ganze Reihe von Phasengrenzlinien gestrichelt dargestellt sind, d.h. nicht genau bestimmt sind. Aus dem Zustandsdiagramm Co-Cr (Bild 9) ist ersichtlich, daß bei der Zusammensetzung ca. 30 % Cr 2 Phasen auftreten, die Co-reiche ϵ -Phase (in den Schlifffbildern hell) und die Cr-reichere Phase, die die Constitution einer $\bar{G}$ -Phase hat (im Schlifffbild dunkler).

Mo besitzt in Cr (Bild 10) vollkommene Löslichkeit im flüssigen und festen Zustand, so daß hier nur 1 Mischkristall auftritt.

Im System Kobalt-Mo (Bild 11) tritt ein Co-reicher über-

sättigter Mischkristall α auf, aus dem sich bei entsprechender Abkühlung eine weitere intermetallische Verbindung, die ϵ' -Phase, ausscheiden kann.

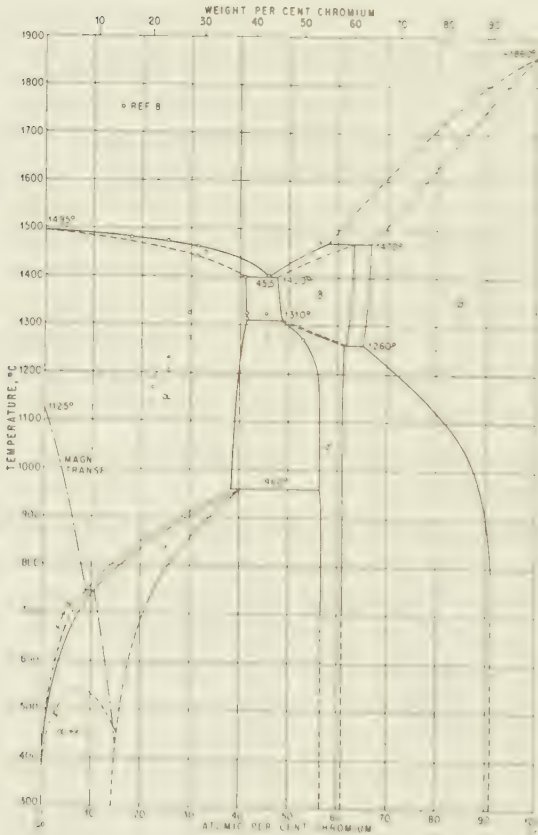


Bild 9 Zustandsdiagramm Co-Cr (nach HANSEN (22))

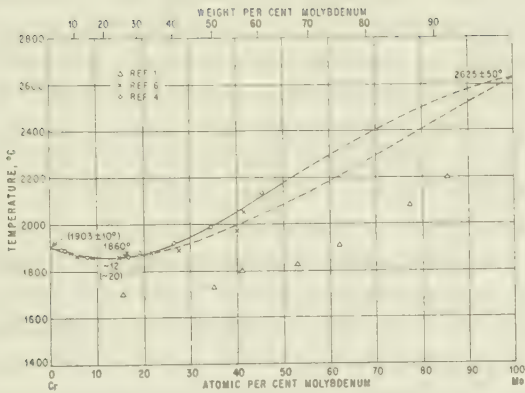


Bild 10 Zustandsdiagramm Cr-Mo (nach HANSEN (22))

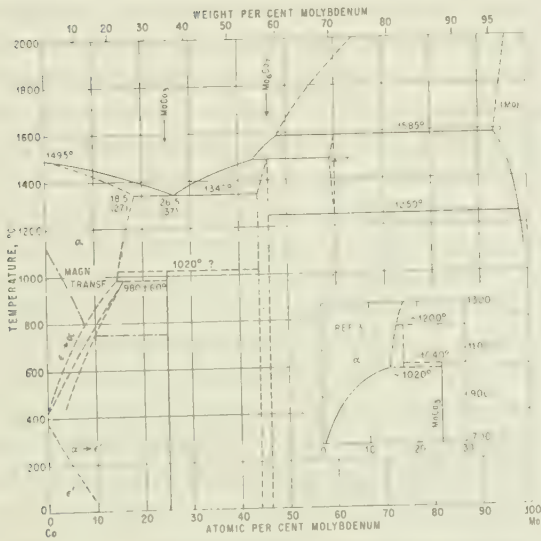


Bild 11 Zustandsdiagramm Co-Mo (Nach HANSEN (22))

Einige weitere Bestandteile der Legierung, meist weniger als 1 Gew.-% sind als Kornfeinungsmittel anzusehen, d.h. bei Einhalten der richtigen Schmelz- und Abkühlbedingungen bewirken diese Mittel die Bildung eines feinkörnigen, stabilen Gefüges, wie es aus Festigkeits- und Korrosionsgründen erwünscht ist.

Das Bild 27 zeigt den Längsschliff einer Co-Cr-Mo Lötung im ungeätzten Zustand bei 11-facher Vergrößerung.

Zwei gelötete Co-Cr-Mo-Platinen im Querschliff sind in Bild 25 und 26 zu sehen. Im Lot sind zahlreiche Hohlräume zu erkennen, die z.T. miteinander in Verbindung stehen. Diese Hohlräume, die vermutlich beim Erstarren des Lotes entstehen und als Lunker anzusprechen sind, schwächen den Querschnitt der Verbindung erheblich und sind u.a. die Ursache für die niedrigere Zugfestigkeit und große Streuung der σ_B -Werte bei den Zugversuchen (Kapitel 3.2). Der dunkle Saum am Rande des Lotwerkstoffes ist z.T. ein optischer Effekt, z.T. eine Ätzerscheinung. Der optische Effekt ist als Reliefbildung beim Polieren zu verstehen, wobei das Lot aufgrund wesentlich geringerer Härte mehr abgetragen wird als der Platinenwerkstoff. Am Übergang Platine-Lot tritt eine runde Kante auf, die bei Hellfeldbetrachtung das Licht in andere Richtungen reflektiert und deshalb dunkler erscheint. Der Ätzeffekt kann so erklärt werden, daß sich bei einer Ätzung auf dem Platinenwerkstoff am Übergang zum Goldlot Potentialunterschiede ausbilden, die zu kathodischen bzw. anodischen Reaktionen führen und dadurch unterschiedlichen Ätzangriff bewirken. Die Bilder 28 bis 31 zeigen die Lötverbindungen bei 200-facher Vergrößerung. Der Platinenwerkstoff setzt sich aus der Co-reichen ϵ -Phase (hell), welche die Matrix bildet und der ζ -Phase (dunkel), die in dendritischer Anordnung vorliegt, zusammen. Die Qualität und Festigkeit einer Lötverbindung hängt u.a. sehr stark von der Diffusion des Lotwerkstoffes in den zu verbindenden Werkstoff ab. Unter Diffusion versteht man i.A. einen makroskopischen Massetransport, der durch Wanderung einzelner Atome hervorgerufen wird. Der sehr komplexe Vorgang, dessen

Kinetik durch die Fickschen Gesetze beschrieben wird, hängt von vielen Faktoren ab, deren wichtigste Konzentrationsgradient, Leerstellenkonzentration, Temperatur, Aktivierungsenergie, Bindungsenergie usw. sind (SEITH, W.: Diffusion in Metallen (50)). Aus den eigenen Gefügeuntersuchungen kann der Schluß gezogen werden, daß bei den vorliegenden Bedingungen und der Werkstoffpaarung Co-Cr-Mo/Au-Lot nur sehr kleine Diffusionszonen vorliegen, da die ursprüngliche Kante der Co-Cr-Mo-Platinen auch bei stärkeren Vergrößerungen (Bilder 28 - 31) keine Abweichung von der ursprünglichen Gestalt erkennen läßt. Aus der Untersuchung der Lötverbindungen kann der Schluß gezogen werden, daß Festigkeitseigenschaften und Qualität der Lötverbindungen stark streuen, was trotz sorgfältigster Durchführung und Einhaltung der entsprechenden Lötvorschriften nicht zu vermeiden war. Die im Zugversuch ermittelten großen Streuungen der $\bar{\sigma}_B$ -Werte sind auf unterschiedliche Poren- bzw. Lunkerbildung im Lotwerkstoff zurückzuführen. An den Zugproben konnte nach dem Bruch festgestellt werden, daß mehrere Proben an der Grenze Rundstab-Lot gerissen waren, was entweder auf eine schlechte Benetzung oder nur sehr geringe Diffusion schließen läßt. Lötverbindungen sind außerdem sehr empfindlich gegen Biegebeanspruchung, so daß die Lotnaht in einem derart belasteten Teil immer eine Schwachstelle sein wird.

3.4.4 Deutung der Gefügeerscheinungen bei den Dentalgoldlegierungen

Die in dieser Arbeit untersuchten Au-Ag-Cu-Legierungen mit der Degussa Bezeichnung Degulor B und Degulor MO, deren Zusammensetzung in Tabelle 1 wiedergegeben ist, finden in der Zahnheilkunde vielseitige Anwendung. Der große Vorteil dieser Legierungen ist ihre ausgezeichnete chemische Beständigkeit. Von Nachteil ist der hohe Preis, der vor allem in den letzten Jahren sprunghaft in die Höhe ging.

Die Legierungen Degulor B und Degulor MO sind als ternäre Legierungen anzusprechen. Degulor MO unterscheidet sich von Degulor B durch seinen höheren Cu-Gehalt, welcher eine Aus-

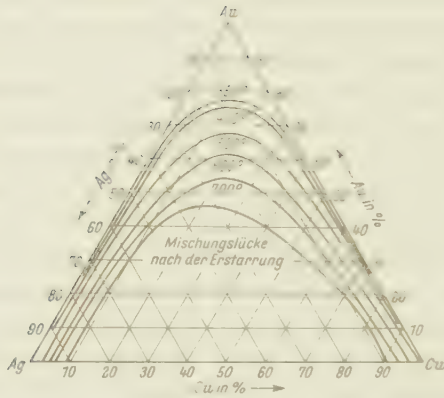


Bild 12 Isotherme Schnitte durch die Mischungslücke im ternären System Au-Ag.Cu (nach G. MASING u. K. KLOIBER (41), i.G. Mc MULLIN u. J.T. NORTON)

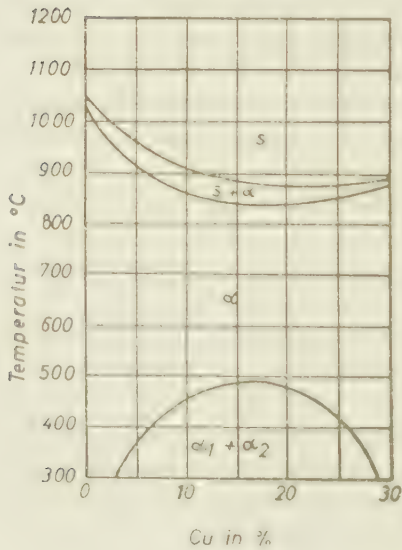


Bild 13 Schnitt durch das Zustandsdiagramm Au-Ag-Cu parallel zur Ag-Cu-Seite mit konstantem Au-Gehalt von 70 %.

härtbarkeit (Vergütbarkeit) bewirkt. In Bild 12 sind isotherme Schnitte durch die vom System Ag-Cu verursachte Mischungslücke im ternären System Au-Ag-Cu gelegt. Diese Mischungslücke verbreitert sich mit abnehmender Temperatur erheblich in Richtung auf die Goldecke des Diagramms und ist der Grund für die Aushärtbarkeit der Legierung. Bild 13 zeigt einen Schnitt durch das Zustandsdiagramm Au-Ag-Cu parallel zur Ag-Cu-Seite mit konstantem Au-Gehalt von 70 %.

Man sieht, daß nach Erstarren der Schmelze bei einem Cu-Gehalt von 10 % (Degulor MO) ab ca. 860°C ein reiner α -Mischkristall vorliegt. Bei weiterer Abkühlung (Gleichgewicht) ordnen sich bei Erreichen der Mischungslücke (ca. 450°C) die bei höherer Temperatur regellos verteilten Atome so an, daß die Würfelflächen abwechselnd nur von Au- bzw. Cu-Atomen besetzt sind. Dieser Vorgang, der auch als Ordnungsumwandlung oder Überstrukturbildung ($\alpha_1 + \alpha_2$) bezeichnet wird und dessen Anfangsstadium im lichtmikroskopisch sichtbaren Gefüge nicht erkennbar ist, verzerrt das ursprünglich kubische Gitter tetragonal und bringt dadurch die Härtesteigerung. Durch höhere Cu-Gehalte könnte eine noch höhere Härtesteigerung erzielt werden, jedoch kommt man dann in den Bereich der chemisch nicht mehr voll beständigen Legierungen. Für die Erzielung optimaler Härte ist es notwendig, die Wärmebehandlungsvorschriften der Hersteller bezüglich der Abkühlung aus der Schmelze oder auch des Auslagerns bei bestimmten Temperaturen genau einzuhalten. Durch die Zusätze von Pt, Pa, Zn in weniger als 1 Gew.-% Anteilen lassen sich eine Erweiterung der Mischungslücke (Pt) mit Kornfeinung sowie größere chemische Beständigkeit und günstige Vergießbedingungen erreichen. Dem Zinkgehalt kommt mehrfache Bedeutung zu. Als erstes läßt sich mit ihm die Farbe des Werkstoffes beeinflussen, was für das Aussehen des Zahnersatzes wichtig ist, zweitens senkt Zn in Verbindung mit Cadmium (Eutektikum Cd-Zn) den Schmelzpunkt der Legierung erheblich, was für die Goldlote von großer Bedeutung ist. Die Bilder 32 bis 35 zeigen die Lötungen der Degulor B Platinen bei 100 bzw. 200-facher Vergrößerung. Man sieht deutlich die Korngrößenunter-

schiede der Platinen, die trotz sorgfältiger Einhaltung der Gießbedingungen nicht vermeidbar waren. Außerdem sind wieder zahlreiche Mikrolunker und vereinzelt Poren zu erkennen. Der ursprüngliche Stoß ist nur noch an wenigen Stellen erkennbar, was für eine gute Verbindung durch Diffusion spricht. Dies ist im Gegensatz zu den Co-Cr-Mo-Platinen aufgrund der Gleichartigkeit des Lotes auch zu erwarten.

Bei den Degulor MO-Lötungen (Bild 36 bis 39) liegt die Zugfestigkeit nur wenig höher als bei den Degulor B-Lötungen. Diese Tatsache ist leicht verständlich, da der Bruch der Lötverbindungen fast immer im Bereich der Lotnaht erfolgt, d.h. daß die Festigkeit der Verbindung vom Lot- und nicht vom Platinenwerkstoff bestimmt wird. Hier kommt die Aushärtbarkeit der Degulor MO-Legierung in Bezug auf die Verbindung nicht zur Auswirkung. Im Gefüge ist der ehemalige Stoß nur noch in vereinzelt kleinen Bereichen erkennbar (Bild 37 und 38). Die Platinen weisen ein sehr gleichmäßiges, feinkörniges Gefüge auf, das fast frei von Seigerungen, jedoch mit Lunkern und vereinzelt Poren behaftet ist. Selbst bei 200-facher Vergrößerung (Bild 39) ist die Lotnaht nicht erkennbar.

3.5 Rasterelektronenmikroskopische (REM) Untersuchungen

Da bei den vorangegangenen metallographischen Untersuchungen in den lichtmikroskopischen Bildern immer wieder Porositäten erkennbar waren, sollte an einigen Beispielen die Art dieser Hohlräume mit dem Rasterelektronenmikroskop erklärt werden. Bei den Zerreißversuchen war nach dem Bruch eines Co-Cr-Mo-Rundstabes in der Bruchfläche ein größerer Hohlraum erkennbar (Bild 40). Bei höherer Vergrößerung (Bild 41 und 42) stellt sich heraus, daß es sich um einen Luncker handeln muß, da die Dendritenäste ungehindert in den Hohlraum gewachsen waren. Bei einer Gasblase dagegen würde die Oberfläche aufgrund des bei der Erstarrung entstehenden hohen Innendruckes glattwandig erscheinen. Im Gegensatz zum Luncker (Bild 41 und 42) stellt sich die Bruchfläche (Bild 43 und 44) glatt dar.

Die vor allem in Bild 44 erkennbare Wabenstruktur deutet eine gewisse Verformbarkeit der Co-Cr-Mo-Gußlegierung an. Die Bilder 45 und 46 zeigen eine Oberflächenporosität bei Degulor B, das Bild 47 eine solche bei Degulor MO. Auch hier handelt es sich um Lunker, die bei der Erstarrung entstanden sind.

3.6 Korrosionsversuche

3.6.1 Allgemeines

Unter Korrosion versteht man die von der Oberfläche ausgehende, durch unbeabsichtigten chemischen oder elektrochemischen Angriff hervorgerufene Veränderung eines Werkstoffes.

Da im Munde eines Patienten Agenzien nur in stark verdünnter Form und für relativ kurze Zeiträume auftreten, spielt der rein chemische Angriff auf die in der Zahnheilkunde verwendeten meist edlen Werkstoffe eine untergeordnete Rolle. Dagegen sind Schädigungen, die durch elektrochemische Vorgänge hervorgerufen werden, weit häufiger zu beobachten. Deshalb sollen folgende Korrosionsmechanismen etwas näher betrachtet werden: Galvanisches Element (z.B. verschiedene Metalle im Munde des Patienten, wobei Speichel als Elektrolyt dienen kann); Lokalelementbildung (z.B. mehrphasige Werkstoffe, Inhomogenitäten in Gußkörpern usw.).

Ein galvanisches Element entsteht, wenn 2 Metalle mit verschiedenem Normalpotential in einen Elektrolyten getaucht werden. Verbindet man die beiden Metalle, so fließt ein Strom; dabei geht der unedlere Partner in Lösung und wird zersetzt. Welches der beiden Elemente anodisch wird, d.h. in Lösung geht, hängt von deren Lage in der Spannungsreihe ab. Die Spannungsreihe ist die Reihe der Elemente mit steigendem Normalpotential ϕ_{ϵ_K} gegenüber Wasserstoff. Das Normalpotential charakterisiert das elektrochemische Verhalten eines Metalles. Es entsteht durch das Lösungsbestreben

eines Elementes in einem Elektrolyten, dem als Gegenkraft der osmotische Druck entgegenwirkt.

Die Spannung eines galvanischen Elementes ist umso größer, je größer die Differenz zwischen den Potentialwerten der das Element bildenden Partner ist.

Mit steigender Spannung geht auch die Auflösung des unedleren Partners schneller vor sich.

Das elektrische Potential eines Metalles folgt aus der Nernst'schen Beziehung:

$${}_0\varepsilon_K = - \frac{RT}{nF} \ln \frac{P}{p} \quad (v) \quad [8]$$

dabei ist: R = Gaskonstante = 8,304 Ws/grd
 T = absol. Temp. °K
 n = Wertigkeit d. Metalls
 F = Faraday'sche Konstante = 96 500 Cb
 P = Elektrolytischer Lösungsdruck
 p = osmotischer Druck

Es ist zu beachten, daß das so errechnete Potential gegenüber Wasserstoff für das reine Metall gilt. Es gibt jedoch einige Metalle, die sich nach einer spanabhebenden Bearbeitung oder aus der Schmelze spontan mit einer dünnen, jedoch sehr dichten Schutzschicht überziehen. Diese Schutzschicht, die sich bei Anwesenheit von Luftsauerstoff bildet, verändert das chemische bzw. elektrochemische Verhalten des Metalles entscheidend. Zu den Metallen, die durch Schutzschichtbildung passiviert werden, gehört neben Al, Co, Ni vor allem Chrom. Reines Cr besitzt ein Normalpotential von - 0,56 V, Cr O jedoch von + 0,82 V, d.h. durch die Schutzschichtbildung bekommen Chrom bzw. Chromlegierungen (mit mehr als 15 % Cr) ein Normalpotential, das etwa dem von Silber (+ 0,808 V) entspricht. Die hohe Korrosionsbeständigkeit von Cr bzw. Cr-Legierungen ist also auf Passivierung durch Schutzschichtbildung zurückzuführen. Nun ist für das Ablaufen von elektrochemischen Lösungsvorgängen in einem galvanischen Element nicht nur die Differenz der Normalpotentiale maßgebend. Es

gibt eine ganze Reihe weiterer Einflüsse, wie Temperatur, Elektrolytzusammensetzung und Konzentration, Wasserstoff- bzw. Sauerstoffgehalt des Elektrolyten, die den Lösungsvorgang beschleunigen bzw. verzögern können. Außerdem ist zu bedenken, daß z.B. durch Anwesenheit von Chlorionen bei höherer Temperatur des Elektrolyten die Schutzschicht von Chrom und Cr-Legierungen zerstört werden kann und dann ein starker Angriff auf das Metall stattfindet. Betrachtet man die in der Zahnheilkunde verwendeten Werkstoffe, so kann gesagt werden, daß Makroelemente im Munde des Patienten vermieden werden können, wenn Metalle Verwendung finden, die in der Spannungsreihe der Elemente nahe beieinander liegen und ein positives Normalpotential aufweisen wie die Edelmetalle Ag, Au, Pt. Auch die Co-Cr-Mo-Legierungen gehören zu dieser Gruppe, solange sie durch eine passivierende Deckschicht geschützt werden. Lediglich bei Zerstörung dieser Deckschicht können bei entsprechenden äußeren Bedingungen Lösungserscheinungen auftreten.

Im Gegensatz zum Makroelement kann die Bildung von Lokalelementen praktisch nicht verhindert werden. Ein Lokalelement liegt vor, wenn sich die Lösungsvorgänge, wie sie am galvanischen Element beobachtet wurden, auf einer Fläche $< 0,01 \text{ mm}^2$ abspielen. Die Entstehung von Lokalelementen kann u.a. folgenden Ursachen zugeschrieben werden: Mehrphasige Gefüge, Ausscheidungen, Einschlüsse metallischer oder oxydischer Art, Schlacken, Konzentrationsunterschiede innerhalb eines Kornes, Oberflächenstörungen z.B. nach Verformung, Orientierungsunterschiede, Stellen unterschiedlicher Belüftung, Korrosionsprodukte an der Oberfläche usw..

Ein Lokalelement entsteht also immer dann, wenn im mikroskopisch kleinsten Bereich Phasen mit unterschiedlichen Potentialwerten in der Metalloberfläche nebeneinander liegen. Die leitende Verbindung zwischen dem anodischen und kathodischen Bereich bildet das Metall selbst, als Elektrolyt wirkt Speichel oder eine entsprechende Modellflüssigkeit ähnlicher Zusammensetzung.

Der unedlere Bereich löst sich anodisch, an der Kathode findet eine Gegenreaktion statt (z.B. Wasserstoffbildung im sauren Milieu). Die höhere Oberflächenaktivität der anodischen Bereiche bewirkt deren verstärkte Auflösung.

In den Bildern 14 und 15 ist der Vorgang der anodischen Auflösung in einem Lokalelement dargestellt (nach CRESS (6)).

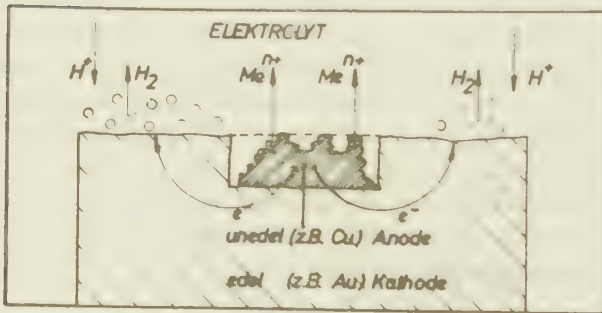


Bild 14 Auflösung des unedlen Bereiches aus der edleren Umgebung der Metalloberfläche

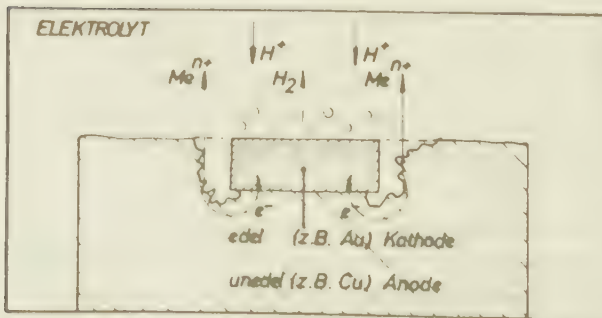
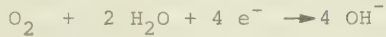


Bild 15 Auflösung der unedlen Umgebung neben dem edleren Bereich der Metalloberfläche

Anodische Reaktion: $\text{Me} \rightarrow \text{M}^{n+} + n\text{e}$

Kathodische Reaktion: $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 \uparrow$ oder



Bei Anwesenheit von O_2 in H_2O

auch für die Korrosion im Mund zutreffend (DIPLICH (12))

3.6.2 Korrosion an der Co-Cr-Mo-Legierung

Betrachtet man die hier verwendete Co-Cr-Mo-Legierung nach den Verbindearbeiten hinsichtlich der zu erwartenden Korrosionsmechanismen, so besteht in nicht zu aggressiven Medien bei RT kaum die Gefahr eines Korrosionsangriffes. Kritisch wird es dann, wenn die passivierende Schutzschicht auf den Co-Cr-Mo-Platinen durch mechanischen Einfluß oder durch höhere Cl-Ionen-Konzentration im Elektrolyten bei etwas erhöhter Temperatur zerstört wird. Da, wie in Kapitel 3.4 bereits beschrieben, die Co-Cr-Mo-Legierung mehrphasig erstarrt, ist mit Lokalelementbildung zwischen den einzelnen Phasen zu rechnen, die zu örtlichen Angriffen wie z.B. Lochfraß führen kann. Bei den gelöteten Platinen ist ein noch stärkerer Angriff zu erwarten, da sich zwischen den in der Praxis verwendeten Goldloten und der Cr- bzw. Co-reichen Phase im Platinenwerkstoff noch größere Potentialunterschiede einstellen.

3.6.3 Korrosion an den Goldlegierungen

Die Au-Legierungen lassen aus mehreren Gründen eine wesentlich höhere Beständigkeit gegenüber Korrosionsangriffen erwarten. Erstens sind die dentalen Goldlegierungen aus thermodynamischen Gründen, wegen ihrer negativen Bildungswärme z.B. für Au_2O_3 - 4,1 kcal je gr. Atom O_2 , selbst in sauerstoffhaltigen Säuren sehr beständig; zweitens liegen diese Legierungen normalerweise einphasig vor.

Hier könnte nur dann ein örtlicher Angriff erfolgen, wenn

z.B. in der Lotnaht Verbindungen der im Lotwerkstoff enthaltenen Elemente, z.B. Zn, Cd, u.ä. ausgeschieden würden. Bei den aushärtbaren Goldlegierungen ist dann ein Korrosionsangriff zu erwarten, wenn durch den Vorgang der Aushärtung (z.B. Ausscheidung einer Cu-reichen Phase) ein mehrphasiges Gefüge entsteht.

In Bild 16 ist graphisch dargestellt, bei welchen Zusammensetzungen im Dreistoffsystem Au-Ag-Cu die Legierung resistent, angreifbar und zersetzbar ist. Außerdem ist ersichtlich, wie die unterschiedlichen Zusammensetzungen die Farben der Legierungen beeinflussen (nach STERNER-RAINER).

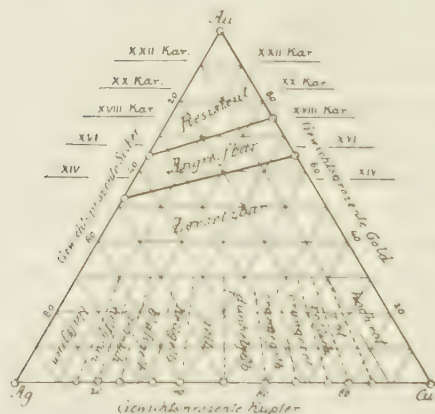


Bild 16 Resistente, angreifbare und zersetzbare Au-Ag-Cu Legierungen

Das Bild macht deutlich, daß die Grenze der Beständigkeit (Resistenz) bei der Legierungszusammensetzung 70 % Au, 18 % Ag, 12 % Cu liegt. Mit steigendem Cu-Gehalt bei fallendem Ag-Gehalt kommt man in den Bereich angreifbar, was auf das Auftreten einer Cu-reicheren Phase zurückzuführen ist. Dadurch wird die Legierung zweiphasig und es kommt zu Lokalelementbildung.

3.6.4 Methoden zur Bestimmung des Korrosionsangriffes

Um die Korrosionsuntersuchungen im Labor durchführen zu können, sind folgende Überlegungen anzustellen.

1. Wie und in welchem Maße kann der Korrosionsangriff gemessen werden?
2. Welcher Elektrolyt läßt in dem relativ kurzen zur Verfügung stehenden Zeitraum ein meßbares Ergebnis zu, ohne durch allzu hohe Konzentration einen Vergleich mit den Verhältnissen im menschlichen Mund voll auszuschießen?
3. Bei welcher Temperatur läßt sich ein sichtbarer Angriff auf die verwendeten Legierungen erzielen?

Zu 1.:

Es existiert eine Vielfalt von Möglichkeiten zur Bestimmung des Korrosionsangriffes an Metallen (Naturversuche, Laborversuche, Betriebsversuche). Ihnen allen ist gemeinsam, daß sie einen sehr hohen apparativen Aufwand erfordern. So geben BUDD und BOOTH (2) Methoden an, mit denen das Korrosionspotential kleiner Bereiche auf einer Metalloberfläche gemessen werden kann. MARXKORS (40) u.a. führten Potentialdifferenzmessungen gegenüber einer Bezugsselektrode durch, die jedoch die Potentialdifferenz der gesamten Metalloberfläche gegenüber der Bezugsselektrode ermittelt und damit keine Schlüsse auf einzelne Phasen im Lokalelement zuläßt. Eine weitere Möglichkeit stellt die Bestimmung der Gewichtsabnahme in Verbindung mit der Messung der Gasentwicklung (Krug-Dissertation (34)) dar.

All diesen Methoden ist gemeinsam, daß sie einen hohen zeitlichen und apparativen Aufwand erfordern, der den Rahmen dieser Arbeit bei weitem übersteigt. Auch die reine Gewichtsbestimmung, die relativ leicht durchzuführen wäre, läßt aufgrund der hohen Beständigkeit der Legierungen in annehmbarer Zeit kaum meßbare Unterschiede erwarten.

Um trotzdem zu Aussagen über Korrosionsangriff zu kommen,

wurde hier ein photographisches Verfahren gewählt.

Die zu untersuchenden Platinen werden hochglanzpoliert und an markierten Stellen bei Dunkelfeldbeleuchtung fotografiert. Nach Durchführung der Korrosionsversuche werden die markierten Stellen erneut aufgesucht und wieder fotografiert. Da bei der Dunkelfeldbeleuchtung hochglanzpolierte Oberflächen total reflektieren, erscheint die Oberfläche schwarz. Erfolgt bei den Korrosionsversuchen ein Angriff, so reflektieren die entstehenden Grübchen oder Löcher einen Teil des auffallenden Lichtes in das Objektiv und die vorher schwarz erscheinende Oberfläche wird an diesen Stellen aufgehell.

Zu 2.:

Im menschlichen Mund wirkt der Speichel, dessen Zusammensetzung in Tabelle 14 dargestellt ist, als Elektrolyt. Bei einem P_H -Wert von 6 - 8 würde man Speichel als Korrosionsmedium ausschließen, doch Schadensuntersuchungen von SIROKA (51), STEGEMANN (55, 56), WEIKART (63) berichten von Korrosionsschäden an Kronen und Brücken, die im menschlichen Mund aufgetreten sind.

H_2O %	Na mg/ml	K	Ca	Mg	P	S	Cl	P_H -Wert
99,4	20	56	12	1	5	(+)	75	6 - 8

Tab. 14: Zusammensetzung des menschlichen Speichels
(nach DANS und LAX (7))

Die zu erwartende Korrosionsgeschwindigkeit bei Verwendung von Speichel als Elektrolyt würde jedoch zu gering sein, um in absehbarer Zeit zu einem sichtbaren Ergebnis zu kommen. In Anlehnung an die Dissertation DIPLICH (12) wurde für die Korrosionsversuche 2 n HCL verwendet.

Zu 3.:

Der Ablauf eines Korrosionsangriffes ist stark von der Temperatur abhängig. Um nun einerseits an den Goldproben einen sichtbaren Angriff zu erreichen, andererseits einen zu starken Angriff auf die Co-Cr-Mo-Proben zu vermeiden, wurde als Temperatur des Elektrolyten 60°C gewählt. Für die Co-Cr-Mo-Platinen war diese Temperatur, wie sich bei den Versuchen herausstellte, zu hoch.

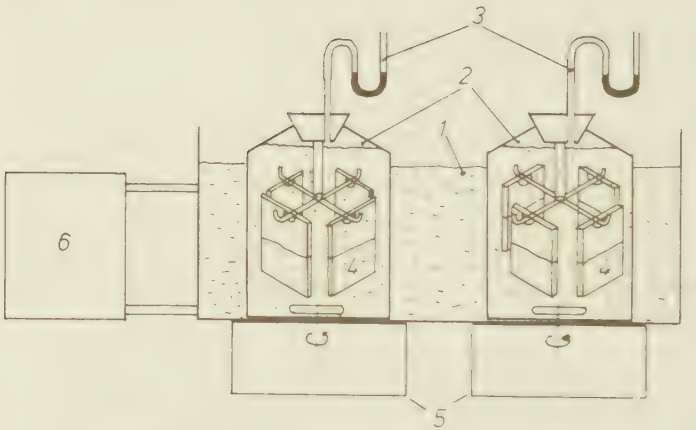
3.6.5 Versuchsaufbau und Versuchsablauf

Zur Durchführung der Korrosionsversuche wurden 2 luftdicht-verschließbare Glaskolben mit je 500 cm³ Fassungsvermögen so angefertigt, daß in der Mitte des Kolbens an einem Glasstab mit entsprechender Aufhängevorrichtung, 4 Platinen eingehängt werden konnten.

Ein Quecksilberventil, das in dem Verschlußstopfen eingebracht war, hielt die Druckverhältnisse im Inneren des Gefäßes konstant. Die beiden Kolben standen in einem Silikonbad, dessen Temperatur von einem Thermostaten auf 60°C gehalten wurde. Ein Magnetrührer verhinderte Konzentrationsunterschiede im Elektrolyten und sorgte für eine gleichmäßige Umspülung der Platinen. Bild 17 zeigt den Versuchsaufbau in einer schematischen Darstellung.

Die gelöteten Proben der einzelnen Dentallegierungen wurden mit einem Diamanten so geritzt, daß die vertikale Linie die Lage der Lotnaht kennzeichnete, während die horizontale das Auffinden eines genau definierten Ortes nach dem Korrosionsversuch ermöglichen sollte.

Die Platinen wurden anschließend in die Aufhängevorrichtung eingehängt und sollten 28 Tage lang bei den vorher genannten Bedingungen dem Elektrolyten ausgesetzt werden.



- | | | | |
|---|-------------------|---|--------------|
| 1 | Silikonbad | 4 | Platinen |
| 2 | Glaskolben | 5 | Magnetrührer |
| 3 | Quecksilberventil | 6 | Thermostat |

Bild 17 Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zu den
Korrosionsversuchen

3.6.6 Korrosionserscheinungen an den Co-Cr-Mo-Proben

Die Bilder 48 und 50 zeigen zwei polierte und markierte Co-Cr-Mo-Proben in einer Dunkelfeldaufnahme.

Bereits nach 72 Stunden waren die gelöteten Co-Cr-Mo-Proben an der Naht so stark korrodiert, daß die unteren Hälften der Platinen auf dem Boden des Gefäßes lagen. Während die Platinenhälften durch Herauslösen der $\bar{G}$ -Phase weitgehend zerstört waren (Bild 49 und 51), lagen die Lotnähte in ihrer ursprünglichen Gestalt auf dem Boden des Kolbens. Der Elektrolyt hatte sich dabei schwarz gefärbt.

Bei den gelöteten Platinen entsteht durch den Potentialunterschied zwischen Goldlot und Platinenwerkstoff ein galvanisches Element, das zu einer raschen Auflösung des Werkstoffes führt. Zusätzlich tritt Lokalelementbildung auf.

3.6.7 Korrosionserscheinungen an den Goldproben

Im Gegensatz zu den Co-Cr-Mo-Platinen war der Angriff im Korrosionsmedium auf die Au-Ag-Cu-Legierungen wie zu erwarten, relativ gering, so daß die vorgesehenen Versuchsbedingungen von 28 Tagen in 2 n HCL bei 60°C eingehalten werden konnten. Nach Beendigung der Versuche war keine Verfärbung des Elektrolyten festzustellen. Die Bilder 52, 54, 56 und 58 stellen die polierten und markierten Degulor B Proben in einer Dunkelfeldaufnahme dar. Die 4 Proben, die von jeder Legierung nach dem Korrosionsversuch betrachtet wurden, zeigten untereinander gleiches Aussehen.

Wie die Bilder 53, 55, 57 und 59 erkennen lassen, war es bei den Lötungen der Degulor B Proben zu einem verstärkten Angriff der Lotnaht gekommen. Auch die Oberflächen der Platinenhälften sind aufgeraut.

Die Bilder 60, 62, 64 und 66 zeigen die polierten und markierten Degulor MO-Proben vor dem Korrosionsversuch.

In den Bildern 61, 63, 65 und 67 (Degulor MO-Lötungen)

sind grundsätzlich die gleichen Tendenzen erkennbar. Der Bereich der Lotnaht ist stärker angegriffen als die Platinenhälften. Auch hier wirkt sich die unterschiedliche Zusammensetzung des Lotes (Degulor Lot 1, Tabelle 7) gegenüber den Goldlegierungen (Tabelle 1) so aus, daß die zwischen Lot- und Platinenwerkstoff bestehenden Potentialdifferenzen zu einer stärkeren Korrosion führen.

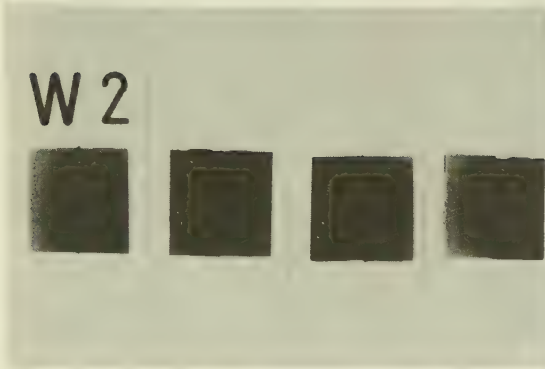


Bild 18

(Platine I - IV)

Co-Cr-Mo Lötung



Bild 19

(Rundstab I - IV)

Co-Cr-Mo Lötung

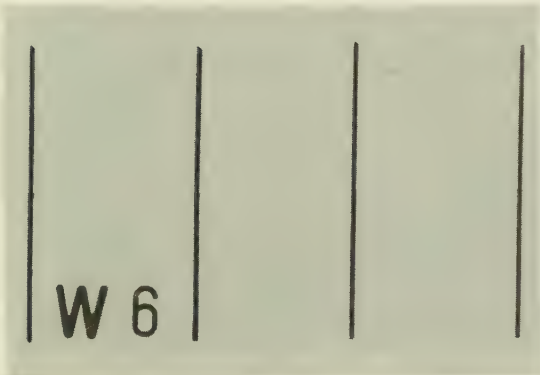


Bild 20

(Rundstab I - IV)

Co-Cr-Mo-Klammerdraht Lötung

(Klammerdraht oben)



Bild 21

(Platine I - IV)

Degulor B Lötung



Bild 22

(Rundstab I - IV)

Degulor B Lötung



Bild 23

(Platine I - IV)

Degulor MO Lötung

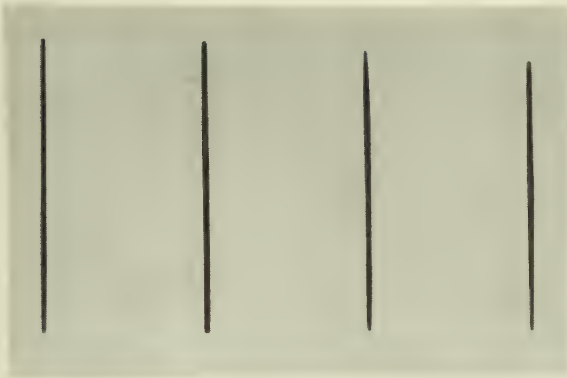


Bild 24
(Rundstab I - IV)
Degulor MO Lötung

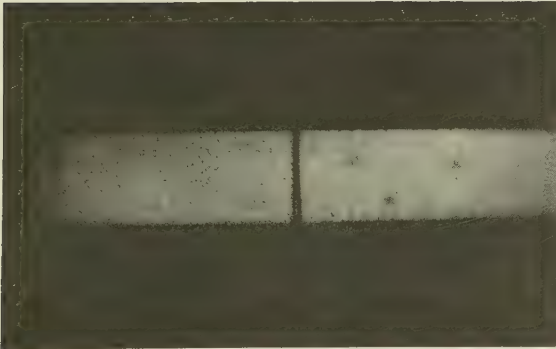


Bild 25
Co-Cr-Mo Lötung (geätzt)
M 18 : 1

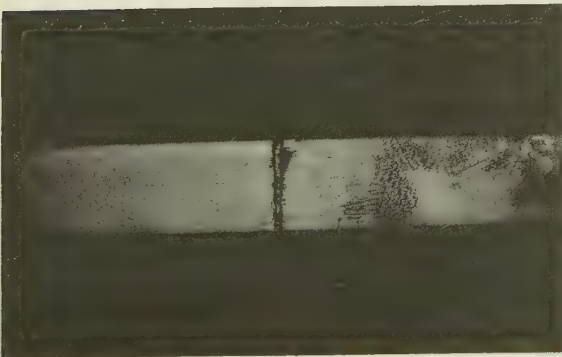


Bild 26
Co-Cr-Mo Lötung (geätzt)
M 18 : 1



Bild 27

Co-Cr-Mo Lötung (ungeätzt)

M 11 : 1



Bild 28

Co-Cr-Mo Lötung

M 200 : 1

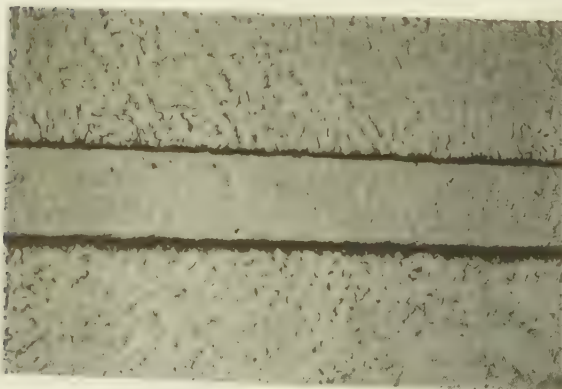


Bild 29

Co-Cr-Mo Lötung

M 200 : 1

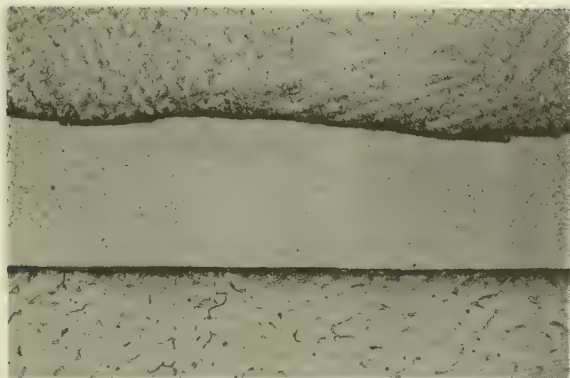


Bild 30

Co-Cr-Mo Lötung

M 200 : 1



Bild 31

Co-Cr-Mo Lötung

M 200 : 1

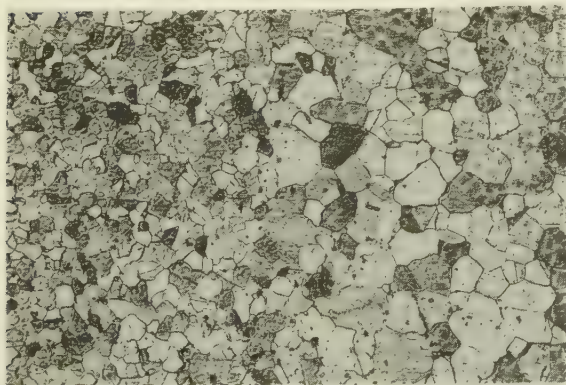


Bild 32

Degulor B Lötung

M 100 : 1

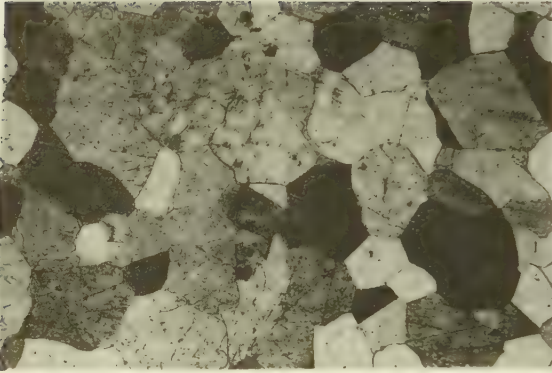


Bild 33

Degulor B Lötung

M 200 : 1

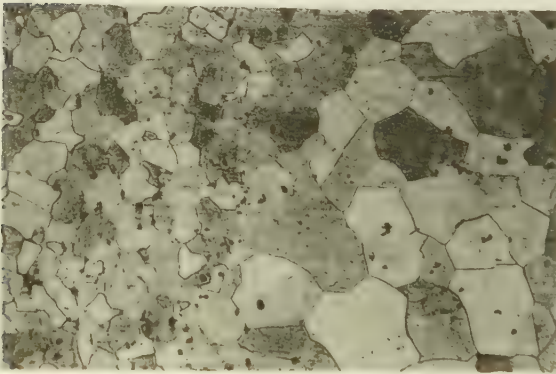


Bild 34

Degulor B Lötung

M 200 : 1

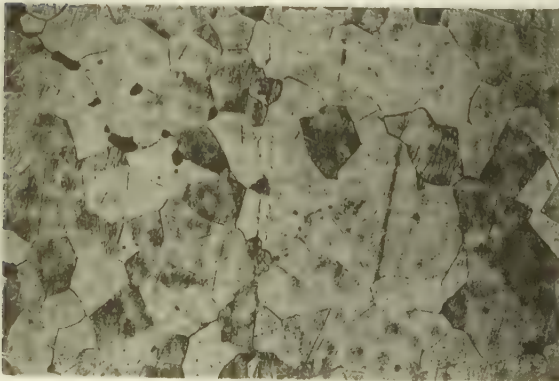


Bild 35

Degulor B Lötung

M 200 : 1

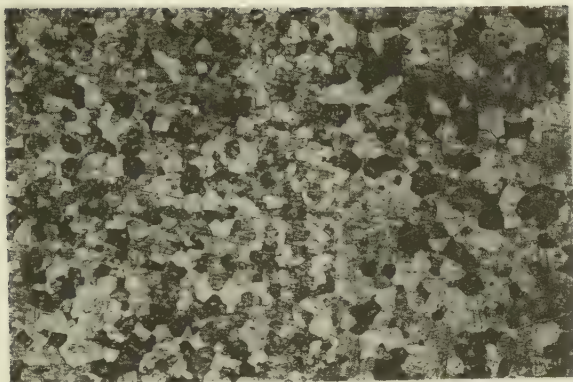


Bild 36

Degulor MO Lötung

M 100 : 1

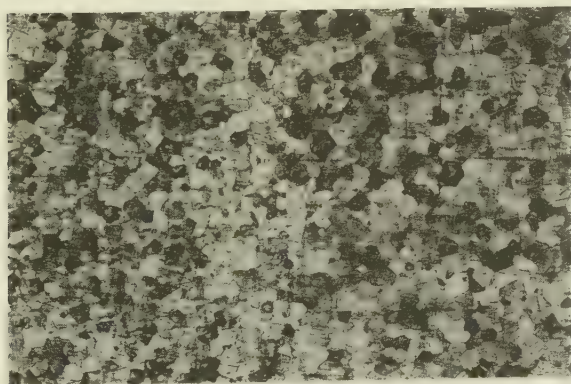


Bild 37

Degulor MO Lötung

M 100 : 1

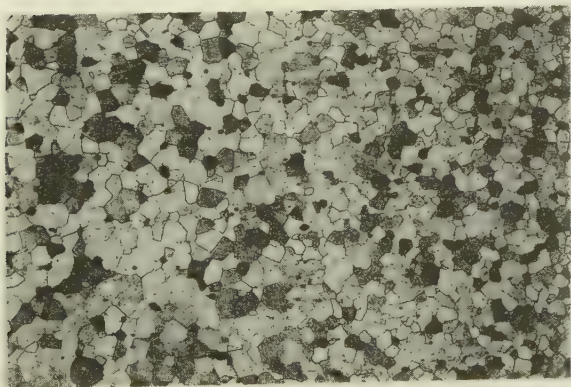


Bild 38

Degulor MO Lötung

M 100 : 1

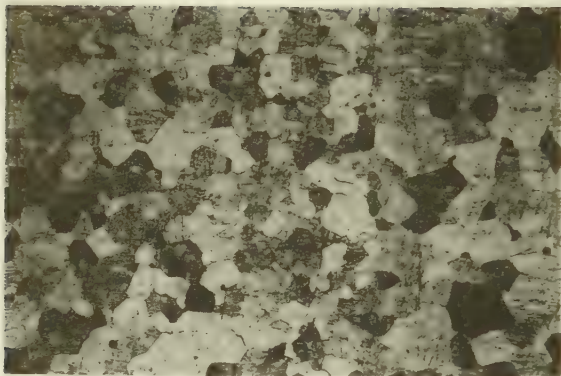


Bild 39

Degulor MO Lötung

M 200 : 1

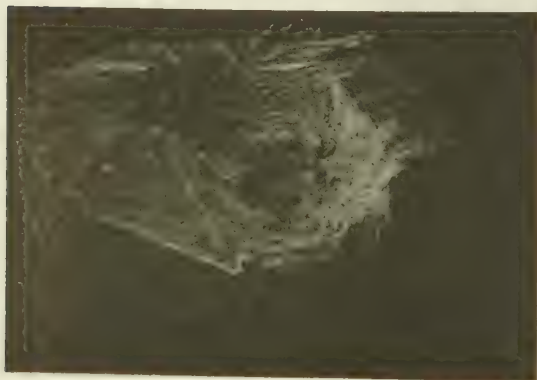


Bild 40

REM-Aufnahme Co-Cr-Mo

M 55 : 1

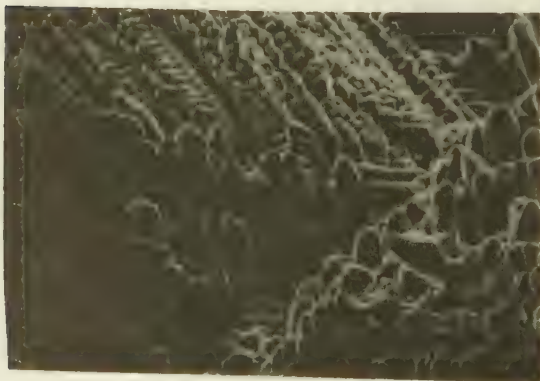


Bild 41

REM-Aufnahme Co-Cr-Mo

M 530 : 1



Bild 42

REM-Aufnahme Co-Cr-Mo

M 1100 : 1

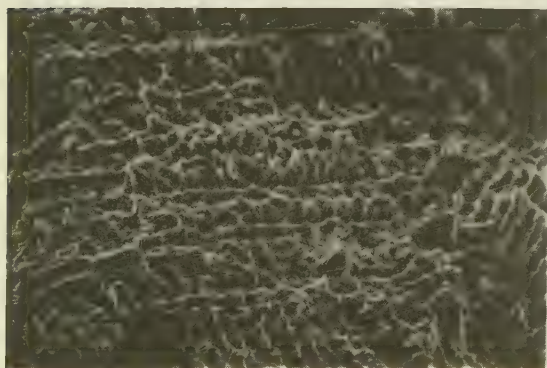


Bild 43

REM-Aufnahme Co-Cr-Mo

M 550 : 1

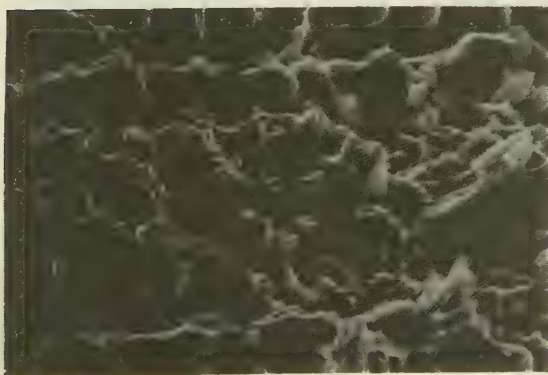


Bild 44

REM-Aufnahme Co-Cr-Mo

M 2200 : 1

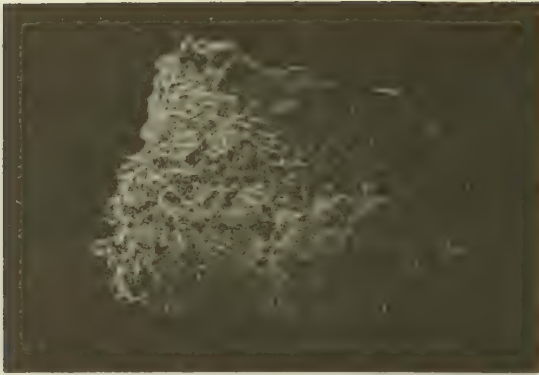


Bild 45

REM-Aufnahme Degulor B

M 2100 : 1



Bild 46

REM-Aufnahme Degulor B

M 1050 : 1



Bild 47

REM-Aufnahme Degulor MO

M 2000 : 1

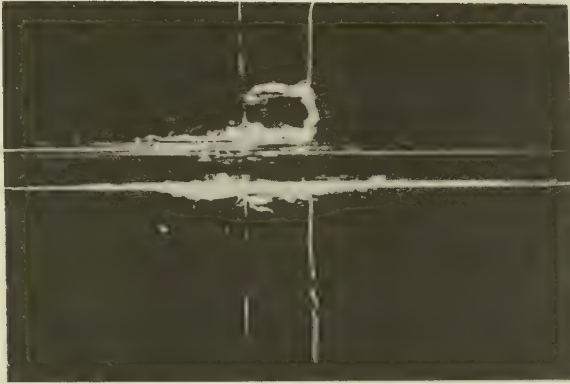


Bild 48
Co-Cr-Mo Lötung
M 200 : 1

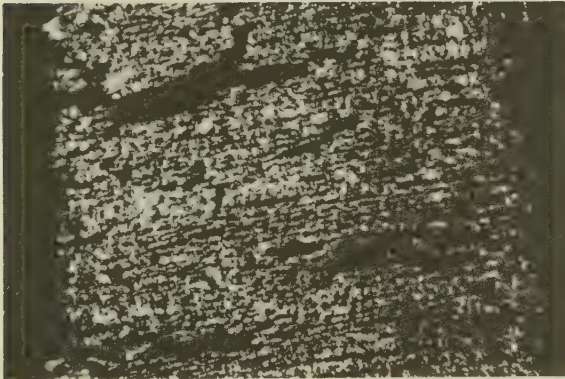


Bild 49
Co-Cr-Mo Lötung
72h in 2 n HCl bei 60°C
M 200 : 1

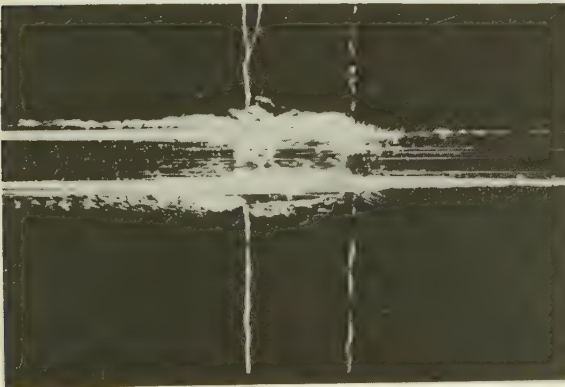


Bild 50
Co-Cr-Mo Lötung
M 200 : 1



Bild 51

Co-Cr-Mo Lösung

72h in 2 n HCl bei 60°C

M 200 : 1

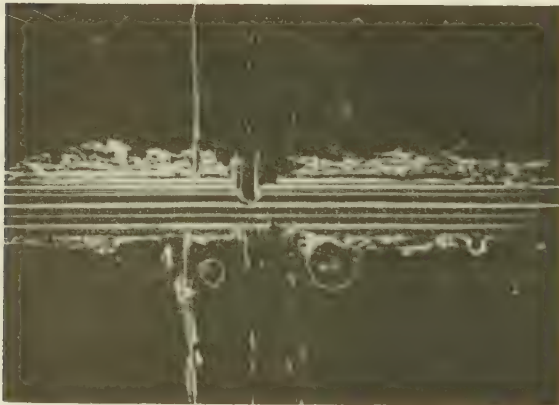


Bild 52

Degulor B Lösung

M 200 : 1



Bild 53

Degulor B Lösung

28 Tage in 2 n HCl bei 60°C

M 200 : 1

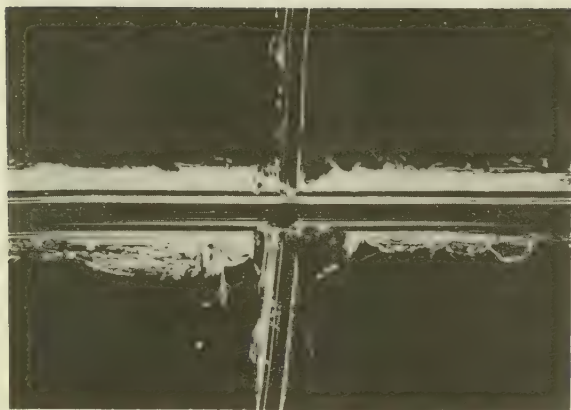


Bild 54

Degulor B Lötung

M 200 : 1



Bild 55

Degulor B Lötung

28 Tage in 2 n HCl bei 60°C

M 200 : 1

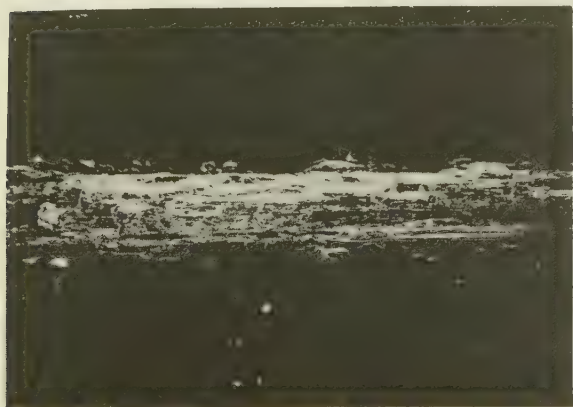


Bild 56

Degulor B Lötung

M 200 : 1



Bild 57

Degulor B Lösung

28 Tage in 2 n HCl bei 60°C

M 200 : 1

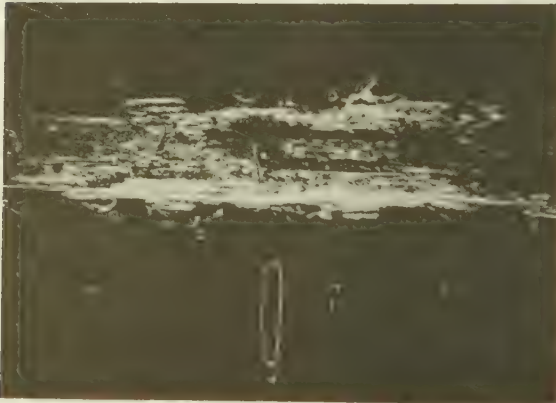


Bild 58

Degulor B Lösung

M 200 : 1



Bild 59

Degulor B Lösung

28 Tage in 2 n HCl bei 60°C

M 200 : 1

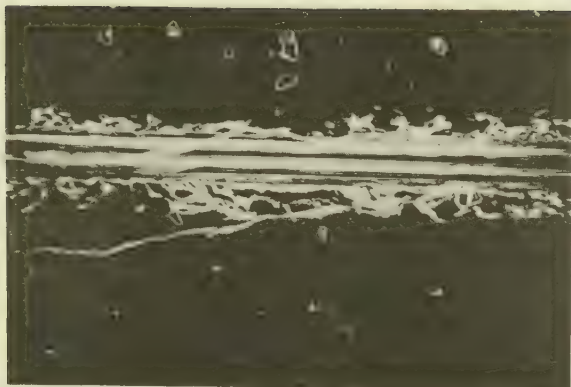


Bild 60

Degulor MO Lötung

M 200 : 1

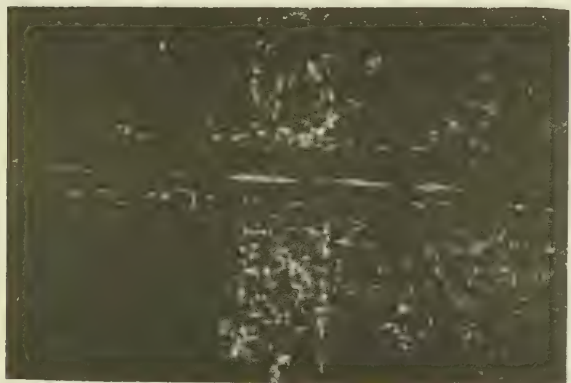


Bild 61

Degulor MO Lötung

28 Tage in 2 n HCl bei 60°C

M 200 : 1

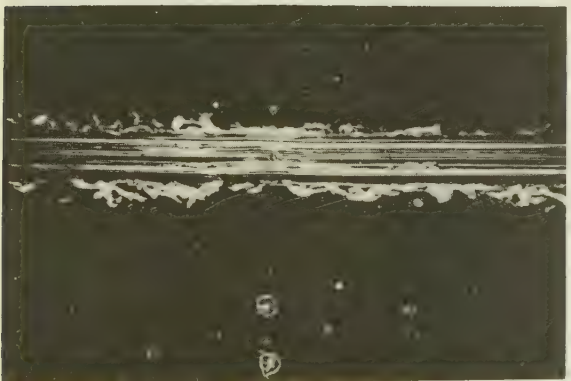


Bild 62

Degulor MO Lötung

M 200 : 1



Bild 63

Degulor MO Lötung

28 Tage in 2 n HCl bei 60°C

M 200 : 1

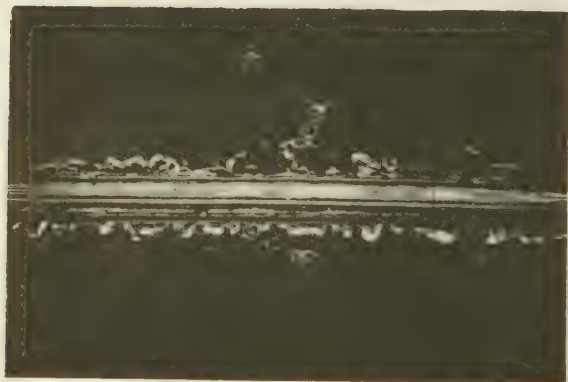


Bild 64

Degulor MO Lötung

M 200 : 1



Bild 65

Degulor MO Lötung

28 Tage in 2 n HCl bei 60°C

M 200 : 1

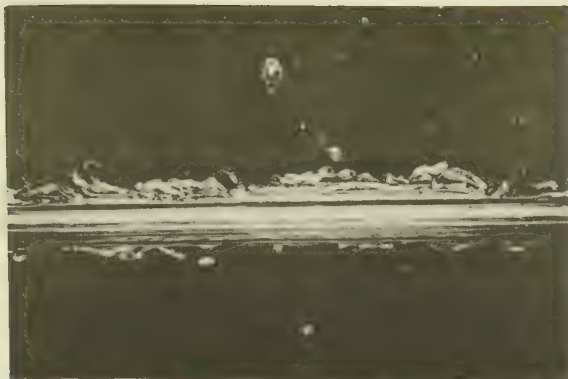


Bild 66

Degulator MO Lötung

M 200 : 1



Bild 67

Degulator MO Lötung

28 Tage in 2 n HCl bei 60°C

M 200 : 1

DISKUSSION

Die Auswertung der Grobstrukturuntersuchungen ergibt, daß das Verfahren zur Beurteilung der Lotnaht bei den hier vorliegenden kleinen Dimensionen nur bedingt geeignet ist. Erkennbare Porositäten können nicht eindeutig der Verbindungszone oder dem Gußkörper zugeordnet werden. Die Lotnähte der Co-Cr-Mo-Proben erscheinen mit Ausnahme einer einzigen Pore fehlerfrei. Auch die Lötverbindungen von Degulor MO zeigen nur bei einer Probe eine Porosität. Bei den Degulor B Platinen, die selbst mit zahlreichen Poren belegt erscheinen, sind die Nähte der Lötungen in drei Fällen von größeren Hohlräumen durchsetzt, die sich vorzugsweise am Rande befinden. Aus deren regelloser Verteilung beim Degulor B läßt sich jedoch eher auf Hohlräume, die vom Guß herrühren, schließen.

Während die Lotnähte aller Rundstäbe bei der Grobstrukturuntersuchung keinerlei Unregelmäßigkeiten erkennen lassen, stellt sich bei den Zugversuchen heraus, daß die Proben oft nicht über die gesamte Querschnittsfläche mit Lot benetzt sind, das heißt, daß der Lotspalt nicht überall ausgefüllt ist. Somit liegt die Lotspaltbreite von ca. 0,1 mm unter der Fehlererkennbarkeit durch die Röntgengrobstrukturuntersuchung.

Bei der Betrachtung der Bruchflächen, die mit einer Ausnahme immer im Bereich der Lotnaht liegen, nach den Zugversuchen zeigt sich, daß der erwartete Füllungsgrad des Spaltes von 80 % und darüber in der Praxis nicht immer zu erreichen ist. Beim Vergleich mit den Degussa-Werksangaben fällt auf, daß die σ_B Werte der eigenen Lötungen beim Degulor B mit 254 N/mm² um ca. 34 % und beim Degulor MO mit 290 N/mm² um 31 % niedriger liegen. Bei allen vier Werkstoffkombinationen weist die Zugfestigkeit der Lötungen eine erhebliche Streubreite auf. Die insgesamt höhere Festigkeit der mit dem Stahl-Goldlot DWL 801 gelöteten Kobalt-Basislegierungen ist vor allem auf die andersartige Zusammensetzung des ge-

nannten Lotes zurückzuführen. Die Versuchsreihe zeigt, daß die Löt-sicherheit in der Praxis nicht sehr hoch ist. Zudem sind Lötverbindungen sehr empfindlich gegen Biegebeanspruchung, so daß die Lotnaht in einem derart belasteten Teil immer eine Schwachstelle sein wird. Die Härtemessungen ergeben, daß die Gußkörper im Bereich der Wärmeeinflußzone keine nennenswerten Veränderungen des Härteverlaufes erfahren.

Bei den metallographischen Untersuchungen finden sich im Falle der Co-Cr-Mo-Proben im Lot zahlreiche Hohlräume unterschiedlicher Größe, die zum Teil miteinander in Verbindung stehen. Sie sind unter anderem die Ursache für die niedrige Zugfestigkeit und die große Streuung der σ_B -Werte. Bei der Werkstoffpaarung Co-Cr-Mo / Au-Lot liegen nur sehr kleine Diffusionszonen vor, da die ursprüngliche Kante der Co-Cr-Mo-Platinen auch bei höheren Vergrößerungen keine Abweichung von der ursprünglichen Gestalt erkennen läßt. Bei den Degulor B Lötungen dagegen ist der ursprüngliche Stoß durch die gute Diffusion des Lotes in den Grundwerkstoff kaum noch erkennbar, wie dies aufgrund der Gleichartigkeit der Werkstoffe auch zu erwarten ist. Die Gefügebilder der Degulor MO-Proben zeigen gegenüber Degulor B lediglich kleinere Korngrößen. Selbst bei 200-facher Vergrößerung ist die Lotnaht kaum erkennbar.

Die Korrosionsversuche der Co-Cr-Mo-Legierung mußten vorzeitig abgebrochen werden, da die Proben bei den gewählten Bedingungen starke Lösungserscheinungen zeigten. Bereits nach 72 Stunden waren sie an der Naht so stark korrodiert, daß die unteren Hälften der Platinen auf dem Boden des Gefäßes lagen. Während die Platinenhälften durch Herauslösung der ζ -Phase weitgehend zerstört waren, lagen die Lotnähte in ihrer ursprünglichen Gestalt auf dem Boden des Kolbens. Durch den Potentialunterschied zwischen Goldlot und Kobalt-Basis-Legierung entsteht ein galvanisches Element, das zu einer raschen Auflösung des Werkstoffes führt. Zusätzlich tritt Lokalelementbildung auf.

Wie zu erwarten, war der Angriff im Korrosionsmedium auf die Au-Ag-Cu-Legierungen relativ gering, so daß die vorgesehenen Versuchsbedingungen von 28 Tagen in 2 n HCl bei 60°C eingehalten werden konnten. Der Bereich der Lotnaht ist stärker angegriffen als die Platinenhälften. Auch hier wirkt sich die andersartige Zusammensetzung des Lotes gegenüber den Goldlegierungen so aus, daß die zwischen Lot- und Platinenwerkstoff bestehenden Potentialdifferenzen zu einer stärkeren Korrosion führen. Dies ist auf die den Schmelzpunkt erniedrigenden Zusatzelemente wie Cu, Cd und Zn zurückzuführen. Grundsätzlich ist festzustellen, daß die Verwendung verschiedener Metalle zur Bildung eines galvanischen Elementes, der Einsatz von mehrphasigen Legierungen zu Lokalelementbildung führen kann und dadurch selbst die in der Zahnheilkunde verwendeten edlen Metalle Korrosionserscheinungen zeigen können.

Außerdem ist hervorzuheben, daß das Lötverfahren auch im Dentallabor insbesondere bei schlecht belüfteten Arbeitsräumen gewerbehygienisch nicht unbedenklich ist. So müssen alle Flußmittel aggressive Chemikalien enthalten, um überhaupt wirksam sein zu können. Sie enthalten in der Hauptsache Bor-Verbindungen sowie einfache und komplexe Fluoride. Diese Bestandteile sind für den menschlichen Organismus, insbesondere Atmungsorgane und Haut, bei falschem Umgang unter Umständen gefährlich. Auch das den Dentalloten zur Schmelzpunkterniedrigung beigelegte Zusatzelement Cadmium verdampft beim Lötprozeß besonders leicht und kann durch pulmonale Resorption akute und chronische Vergiftungserscheinungen hervorrufen. Seine Wirkung beruht wahrscheinlich auf der Verbindung von Cd^{++} mit SH-haltigen Enzymsystemen, ähnlich wie beim Arsen, und ihre dadurch zustande kommende Blockierung. Schon nach Inhalation geringer Konzentrationen (2 µg Cd/l Luft über 30 min.) entwickelt sich nach anfänglich uncharakteristischen katarrhalischen Erscheinungen nach einer Latenzzeit von mehreren (bis zu 24) Stunden ein toxisches Lungenödem. Die MAK (maximale Arbeitsplatzkonzentration) wurde aufgrund arbeitsmedizinischer

Studien auf $0,1 \text{ mg/m}^3$ angesetzt. Allerdings fehlt es bisher an verlässlichen Untersuchungen über den Gesundheitszustand nach langzeitiger Exposition bei dem Grenzwert.

ZUSAMMENFASSUNG

Neben der Methode des Angießens wird im Dentallabor fast ausschließlich das Löten als thermische Verbindungsart angewandt. Während in der Industrie bei der Weiterentwicklung der Löt- und Schweißverfahren erhebliche Fortschritte erzielt wurden, arbeitet der Zahntechniker immer noch mit Lötpistole und Flußmittel. In dieser Arbeit soll die Löt-sicherheit überprüft und festgestellt werden, ob das angewandte Lötverfahren den Ansprüchen, die heute an die Verbindetechniken gestellt werden können, noch gerecht wird.

Zunächst erfolgt die Herstellung geeigneter Proben aus den Kobalt-Chrom-Molybdän und den beiden Dentalgold Gußlegierungen. Nach deren thermischer Verbindung durch Löten werden die Prüfkörper Grobstrukturuntersuchungen, Zugversuchen, Härtemessungen, metallographischen Untersuchungen und Korrosionsversuchen unterzogen.

Es kann gezeigt werden, daß der erwartete Füllungsgrad des Lotspaltes von 80 % und darüber in der Praxis nicht immer zu erreichen ist. So weist auch bei allen vier Werkstoffkombinationen die Zugfestigkeit eine erhebliche Streubreite auf. Außerdem liegen die σ_B -Werte der eigenen Lötungen beim Degulor B um 34 % und beim Degulor MO um 31 % niedriger als vom Hersteller des Dentallotes angegeben.

Bei den metallographischen Untersuchungen der Werkstoffpaarung Co-Cr-Mo / Au-Lot liegen nur sehr kleine Diffusionszonen vor, während beim Degulor B und Degulor MO selbst bei 200-facher Vergrößerung die Lotnaht kaum erkennbar ist.

Durch die zwischen Goldlot und Kobalt-Basis-Legierung bestehenden Potentialdifferenzen kommt es im gewählten Korrosionsmedium infolge Ausbildung eines galvanischen Elementes zu einer raschen Auflösung des Werkstoffes. Selbst beim Degulor B und Degulor MO erfolgt ein verstärkter Angriff

im Bereich der Lotnaht.

Außerdem wird hervorgehoben, daß das im Dentallabor angewandte Lötverfahren gewerbehygienisch nicht unbedenklich ist.

Herrn Professor Dr. E. Kraft, Direktor der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik der Universität München, danke ich für die Überlassung des Themas, für die vielen Anregungen und für das große Interesse, das er an dieser Arbeit gezeigt hat. Nur durch seine Unterstützung bei meinem Antrag auf ein Promotionsstipendium nach dem Bundesgraduierten-Förderungsgesetz war es möglich, die finanziellen Mittel zur Durchführung der Versuchsreihen zu beschaffen.

Herrn Prof. Dr. Ing. habil H. Borchers, Direktor des Institutes für Metallurgie und Metallkunde der Technischen Universität München, danke ich für seinen wissenschaftlichen Rat bei der Planung der Versuche und für das großzügige Bereitstellen der Institutseinrichtungen.

Mein ganz besonderer Dank gilt seinem Mitarbeiter Herrn R. Meier, der mir über insgesamt 4 Jahre immer mit Rat und Tat zur Seite gestanden hat.

Den Herren Dipl.-Ing. G. Erdmann und Ing. grad. P. Löbert habe ich für die Möglichkeit der Durchführung der Grobstrukturuntersuchungen im Allianz-Zentrum für Technik GmbH, Ismaning, zu danken.

Herrn Dr. rer. nat. H. Knosp von der Dental-Technologie Degussa, Pforzheim, danke ich für nicht publizierte Informationen.

LEBENS LAUF

Am 12. Oktober 1938 wurde ich als erster von 2 Söhnen der Eheleute Ottomar und Anny Dielert, geb. Brockmeyer, zu Berlin geboren und römisch-katholisch erzogen.

Nach dem Besuch der Volksschulen in Freiwalden/Schlesien, Asten/Oberbayern, Schapdetten/Westf. und Münster ging ich ebendort ab Ostern 1950 zum staatlich humanistischen Gymnasium Paulinum. 1952 wechselte ich zum mathematisch naturwissenschaftlich städtischen Ratsgymnasium über, wo ich Ostern 1959 das Zeugnis der Reife erhielt.

Anschließend studierte ich in Münster und Köln Medizin.

Am 22. Januar 1966 legte ich an der Westfälischen Wilhelms-Universität die ärztliche Prüfung ab. Am 15. August 1967 promovierte ich ebendort und erhielt den Grad eines Doktors der Medizin.

Nach Ableistung der Medizinalassistentenzeit am Josefs-Hospital Bochum und am Evangelischen Krankenhaus Hattingen in den Pflichtfächern Innere Medizin, Chirurgie und Gynäkologie wurde mir am 29. Januar 1968 vom Innenminister des Landes Nordrhein-Westfalen die Bestallung als Arzt erteilt.

Im Zuge der Fortbildung in der Inneren Medizin arbeitete ich anschließend als Vollassistent am Evangelischen Krankenhaus Hattingen. Ab 1. Februar 1969 war ich als Assistenzarzt im Dienst der Landeshauptstadt München an der II. chirurgischen Abteilung des Krankenhauses München-Schwabing tätig.

Da mein Berufsziel der Facharzt für Mund- und Kieferchirurgie war, begann ich im Wintersemester 1969/70 mit dem Studium der Zahnmedizin an der Ludwig-Maximilians-Universität München. Die Bestallung als Zahnarzt wurde mir am 6. Oktober 1972 vom Bayerischen Staatsminister des Inneren erteilt.

Am 15. Januar 1973 begann ich mit der Facharztausbildung an der Kieferchirurgischen Abteilung der Klinik für Zahn-Mund- und Kieferkrankheiten der Universität München als Verwalter der Dienstgeschäfte eines wissenschaftlichen Assistenten.

Am 4. September 1973 wurde ich zum wissenschaftlichen Assistenten ernannt. Seit dem 16. Januar 1976 bin ich Facharzt für Mund- und Kieferchirurgie.

6. LITERATURÜBERSICHT

- | | | |
|---|------------------------------|---|
| 1 | BECKERT, M. und
H. KLEMM | Handbuch der metallographischen
Ärzteverfahren.
VEB Deutscher Verlag für Grund-
stoffindustrie
Leipzig (1962) |
| 2 | BUDD, M.K. und
F.F. BOOTH | Methoden zur Messung des Korro-
sionspotentials kleiner Bezirke
auf einer Metalloberfläche.
Die Metalloberfläche
7 (1965) |
| 3 | Cobalt Monograph | 7 (1971) |
| 4 | COLBUS, J. | Probleme der Löttechnik
Schweißen und Schneiden
6, 287 (1954) |
| 5 | Cowadental | Werksangabe der Fa. Cowadental
Düsseldorf |
| 6 | CRESS, Th. | Einführung in das Wesen der
Korrosion.
Die Metalloberfläche
6 (1962) und 8 (1962) |
| 7 | DÁNS, J. und
E. LAX | Taschenbuch für Chemiker und
Physiker
Stuttgart (1962) |
| 8 | Degussa | Werksangaben
Degussa Metall-Abteilung
Frankfurt (Main) |

- | | | |
|----|--------------------------------|--|
| 9 | Degussa-Brief | No. 38, 12 (1966)
No. 39, 1 (1968)
No. 40, 11 (1969)
No. 42 (1972) |
| 10 | DEW | Deutsche Edelstahlwerke A.G.
Bochum
Werksmitteilung vom 4.3.1974 |
| 11 | DIN 50 133
DIN 85 25 | Härtemessung nach Vickers
Beuth Vertrieb Köln
Blatt 1 März (1965) |
| 12 | DIPLICH, M. | Werkstoffliche Untersuchungen
an gekennzeichnetem Zahnersatz
Med. Diss. Universität München
(1970) |
| 13 | DOMKE, W. | Werkstoffkunde und Werkstoff-
prüfung
Essen (1971) |
| 14 | ECKMANN, M. | Med. Diss. F.U. Berlin
(1955) |
| 15 | EICHNER, K. | Leitfaden zahnärztlicher Werk-
stoffe und ihre Verarbeitung.
Berlinische Verlagsanstalt GmbH,
Berlin (1967) |
| 16 | ENGLER, S. und
W. PATTERSON | Gießerei 13, 123
(1961) |
| 17 | FALCK, K. | Einführung in die Werkstoff-
kunde für Zahnärzte.
München (1948) |

- 18 GAGLIANO, F.P., R.M. LUMELEY und L.S. WATHKINS Proceedings of the IEEE
2, 57 (1969)
- 19 GORDON, T.E. und D.L. SMITH J. Prosth. Dent. 24 (4)
472-476, Oct. (1970)
- 20 HALBACH, R. Die Verfahren zur Verarbeitung
von Chrom-Nickel-Stahl und Ko-
balt-Chrom-Legierungen zu Zahn-
ersatz.
Techn. Mitteilungen Krupp, Nr. 3
August (1956)
- 21 Über die Festigkeitseigenschaf-
ten des nichtrostenden Stahles.
Dtsch. zahnärztl. Wschr. 29
(1933)
- 22 HANSEN, M. und K. ANDERKO Constitution of Binary Alloys,
2. Aufl. Mc Graw-Hill Book Comp.
Inc. New York, Toronto, London
(1958)
- 23 HEER, W. Häufige Mißerfolge und ihre Ur-
sachen bei festsitzendem Zahn-
ersatz
Dtsch. zahnärztl. Z. 3
(1954)
- 24 HENKEL, G. Die metallographischen Grund-
lagen der zahnärztlichen Edel-
stähle.
Dtsch. zahnärztl. Wschr. 21
(1944)
- 25 HENKEL, G. Documenta Geigy
7. Auflage Basel (1968)

- 26 HERING, H. in Eichner, K. - siehe dort
- 27 HEROLD, K.H. Med. Diss. F.U. Berlin
(1955)
- 28 HOUDREMONT, E. Die rostfreien Stähle, ihre
Eigenschaften und Herstellung.
Kruppsche Monatshefte Essen
(1930)
- 29 JANTZEN, J. Die zahnärztlichen Edelstähle
Aus Häupl-Meyer-Schuchardt.
"Die Zahn-, Mund- und Kiefer-
heilkunde".
Handbuch f.d. Zahnärztl. Praxis
München, Berlin 19 (1955)
- 30 JUNG, T. in Eichner, K. - siehe dort
S. 333
- 31 KEMPIAK, M.A. Die Veränderungen rostfreier
Stahldrähte für zahntechn.
Zwecke durch die thermische
Bearbeitung im Laboratorium.
Med. Diss. F.U. Berlin (1955)
- 32 KERR, E.L. Phys. Rev. A 4, 1195 (1971)
- 33 KNOSP, H. in Degussa Pforzheim Dental-
Technologie
Pforzheim, Persönliche Mittei-
lung vom 27.2.1974
- 34 KRUG, H. Das Korrosionsverhalten von Zink
und Zinklegierungen.
Techn. Diss. Techn. Hochschule
München (1970)

- 44 Laser + elektro optic, Aarau,
4, 49 (1972)
- 45 NITZSCHE, R. Arbeiten und Aufgaben des Staat-
lichen Materialprüfungsamtes
auf dem Kunststoffgebiet.
Kunststoff-Technik u. Kunst-
stoff-Anwendung 2 (1939)
- 46 PATTERSON, W. und Gießerei 13, 123
S. ENGLER (1961)
- 47 SCHATZ, J. Die metallurgischen Vorgänge
zwischen Hartlot und Grundwerk-
stoff und Folgerungen für die
lötgerechte Konstruktion.
Schweißen und Schneiden
9, 522 (1957)
- 48 SCHOENBECK, F. Kurzer Leitfaden der Metall-
kunde
Berlin (1933)
- 49 SCHWINDLING, R. in Eichner, K. - siehe dort
S. 60
- 50 SEITH, W. Diffusion in Metallen
- 51 SIROKA, A. Gold und Wiplamettall im glei-
chen Munde
Zahnärztl. Rdsch. 1 (1930)
- 52 SMITH, D.L. und J. Prosth. Dent. 24 (4): 472
T.E. GORDON (1970)
- 53 STEGEMANN, K. Korrosionserscheinungen an Den-
tallegierungen
Dtsch. Zahnärztl. Z. 1 (1971)

- 54 Über Potentialmessungen an
Metallegierungen.
Zahnärztl. Rdsch. 65, 560 (1956)
- 55 Korrosionserscheinungen an Den-
tallegierungen
Teil I: Untersuchungen an homo-
genen Edelmetall-Legie-
rungen.
Dtsch. Zahnärztl. Z. 11,
391 (1956)
Teil II: Untersuchungen an Den-
tal-Goldstählen
Dtsch. Zahnärztl. Z.
(1958)
- 56 Korrosionsbeständigkeit von
Dentallegierungen.
Habilitationsschrift T.U.
Berlin (1956)
- 57 Beilage: Prothetik und Werk-
stoffkunde
7. Jahrg. H. 1, S. 105 - 116
- 58 Welchen Nutzen haben Potential-
messungen im Munde?
Zahnärztl. Rdsch. 68, 256 (1959)
- 59 TOFAUTE, W. Werkstoffe für die Herstellung
von Zahnersatz aus Chrom-Nickel-
Stahl, Kobalt-Chrom-Molybdän-
und nickelhaltigen Kobalt-Chrom-
Legierungen.
Techn. Mitteilungen Krupp Nr. 3
Essen August (1956)

- 60 WAGNER, E. in Eichner, K. - siehe dort
S. 193
- 61 WATHKINS, L.S., Proceedings of the IEEE,
F.P. GAGLIANO und Vo. 57, No. 2 (1969)
R.M. LUMELEY
- 62 WEIKART, P. Werkstoffkunde für Zahnärzte
München (1966)
- 63 Korrosion und Verfärbung an
Goldlegierungen
Dtsch. Zahnärztl. Z. 6
(1960)

